



Marcelo Daniel Leal Viegas

Licenciado em Engenharia Civil

Modelação física do galgamento do quebra-mar do porto de Albufeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, Doutora,
FCT-UNL/LNEC

Co-orientador: Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos Reis, Doutora,
LNEC

Juri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu
Vogais: Prof. Doutor João Gouveia Leal
Prof. Doutora Maria Teresa Reis



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Abril, 2014



Marcelo Daniel Leal Viegas

Licenciado em Engenharia Civil

Modelação física do galgamento do quebra-mar do porto de Albufeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, Doutora,
FCT-UNL/LNEC

Co-orientador: Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos Reis, Doutora,
LNEC

Juri:

Presidente: Prof. Doutor Corneliu Cismasiu

Vogais: Prof. Doutor João Gouveia Leal

Prof. Doutora Maria Teresa Reis



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Abril, 2014

“Copyright” Marcelo Daniel Leal Viegas, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Dr.^a Maria da Graça Neves pela oportunidade que me proporcionou na realização desta dissertação, pela sua incansável ajuda, simpatia e compreensão.

Agradeço também à Dr.^a Teresa Reis pelos seus conselhos e ajuda na execução desta Dissertação.

Ao Eng.^o Diogo Neves pela infindável ajuda durante a fase de ensaios e na fase de análise de dados.

Ao Dr. Eric Didier, por toda a ajuda que me proporcionou.

Ao Eng.^o Jorge Gadelho e ao Eng.^o Rui Reis pelo material e apoio proporcionado.

À Ana Passarinho, ao Odair e ao Ricardo pelo apoio dado no laboratório.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) pelo espaço e equipamentos disponibilizados.

Agradeço também aos meus pais por toda a ajuda e apoio que me proporcionaram.

À minha mulher, que me apoiou sempre nos momentos mais complicados, ajudando-me sempre a ultrapassar as dificuldades.

Por fim, gostaria de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL) que me permitiu ao longo do meu percurso académico chegar a esta fase.

Resumo

O objetivo desta dissertação é estudar o fenómeno do galgamento em estruturas marítimas. Em particular, realizaram-se ensaios em modelo físico para o estudo da interação da onda com um quebra-mar da costa portuguesa: o quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

Os ensaios em modelo físico de um perfil do quebra-mar foram realizados num canal de ondas do LNEC, à escala 1:30. Foram medidas elevações da superfície livre em diferentes pontos do canal e o volume galgado para diferentes condições de agitação marítima regular. Os caudais médios galgados e as alturas de onda foram calculados com base nas medições efetuadas durante os ensaios e foi realizada uma análise da influência nos resultados das características da agitação. Neste sentido, realizaram-se dois grupos de ensaios: no primeiro, manteve-se o período da onda, $T=12$ s, e consideraram-se cinco valores de altura de onda, de 3.5 m a 5.5 m, com um incremento de 0.5 m; no segundo, adotou-se um valor de $H=4$ m e variou-se o período de 10 s a 14 s, com um incremento de 2 s. Todos estes ensaios foram realizados sem e com o perfil do quebra-mar no modelo.

Com a análise do primeiro grupo de ensaios concluiu-se que, para um período de 12 s, apenas se obteve galgamento para alturas de onda no protótipo superiores a 3.5 m e que o caudal médio galgado aumentou com o aumento de altura da onda. Analisando o segundo grupo de ensaios, para uma altura de onda constante igual a 4 m, considerando os períodos de 10 s, 12 s e 14 s, verificou-se que para os 10 s o caudal médio galgado era nulo e que o seu valor aumentava consideravelmente com o aumento do período da onda.

Palavras-chave: Galgamento, Quebra-mar de taludes, Canal de ondas, superfície livre, caudal médio de galgamento

Abstract

The goal of this dissertation is to study the phenomenon of wave overtopping over maritime structures. In particular, tests were conducted on physical model for the study of the interaction of waves with a breakwater located at the coast of Portugal: the breakwater West of the fishing port of Albufeira.

The physical model tests of a cross-section of the breakwater were performed on one of LNEC's wave flumes using a geometrical scale of 1:30. The free surface elevation was measured at different points along the flume and the volume of overtopping was collected for different regular wave conditions. The mean overtopping discharges and wave heights were calculated based on the measurements performed during the tests and an analysis was conducted on the influence of the wave conditions on the results. There were two groups of tests: in the first group the wave period, $T=12$ s was kept constant, and five values of wave height were considered, from 3.5 m to 5.5 m, with an increment of 0.5 m; in the second group, a value of height of 4 m was used and the period was varied from 10 s to 14 s, with an increment of 2 s. All these tests were performed without and with the cross-section of the breakwater in the model.

From the analysis of the first group of tests it can be concluded that, for the wave period of 12 s, overtopping only occurred for wave heights greater than 3.5 m (in the prototype) and the mean overtopping discharge increases with the wave height. The second group of tests showed that for a constant wave height of 4 m there was no overtopping for $T=10$ s and the mean overtopping discharge increased considerably with the increase of the wave period from 10 s up to 14 s.

Keywords: Wave overtopping, Rubble-mound breakwater, wave flume, surface elevation, mean overtopping discharge

Lista de Símbolos

A_c	Distância entre o nível de repouso e a berma permeável do coroamento	[m]
D_n	Diâmetro nominal dos blocos de proteção	[m]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G_c	Largura da berma do coroamento	[m]
h	Profundidade	[m]
H	Altura de onda	[m]
H_m	Altura de onda média	[m]
H_s	Altura significativa da onda, equivalente à média de 1/3 das ondas mais altas de um registo	[m]
H_{s_m}	Altura significativa da onda no modelo	[m]
H_{s_p}	Altura significativa da onda no protótipo	[m]
L	Comprimento de onda; distância	[m]
L_0	Comprimento de onda ao largo	[m]
L_m	Distância no modelo	[m]
L_p	Distância no protótipo	[m]
M	Massa do bloco de proteção	[Kg]
M_m	Massa dos blocos de proteção no modelo	[Kg]
M_p	Massa dos blocos de proteção no protótipo	[Kg]
n	Número de pontos a considerar na fórmula do RMSE	[-]
N_s	Número de estabilidade	[-]
Q	Caudal médio de galgamento	[m ³ /s/m]
Q_m	Caudal médio de galgamento no modelo	[m ³ /s/m ou l/s/m]
Q_p	Caudal médio de galgamento no protótipo	[m ³ /s/m ou l/s/m]
R_c	Altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso	[m]
R	Espraçamento	[m]

s	Declividade da onda	[-]
t	tempo	[s]
T	Período da onda	[s]
T_m	Período da onda no modelo	[s]
T_m	Período médio	[s]
T_p	Período da onda no protótipo	[s]
V	Volume de galgamento	[m ³]
V_m	Volume no modelo	[m ³]
V_p	Volume no protótipo	[m ³]
x	Posição das sondas no canal de ondas regulares	[m]
x_i	Valores de referência para o cálculo do RMSE	[-]
y_i	Valores do estimador para o cálculo do RMSE	[-]
α	Ângulo do talude da estrutura (ou da praia) com a horizontal	[°]
β	Ângulo de incidência da onda com a normal à estrutura	[°]
ξ	Número de Iribarren	[-]
Δ	Massa volúmica relativa	[-]
Δ_m	Massa volúmica relativa do modelo	[-]
Δ_p	Massa volúmica relativa do protótipo	[-]
λ	Escala do modelo	[-]
π	Constante de Arquimedes com valor aproximado de 3.14	[-]
ρ_a	Massa volúmica dos blocos de proteção	[Kg/m ³]
ρ_{am}	Massa volúmica dos blocos de proteção no modelo	[Kg/m ³]
ρ_{ap}	Massa volúmica dos blocos de proteção no protótipo	[Kg/m ³]
ρ_w	Massa volúmica da água	[Kg/m ³]
ρ_{wm}	Massa volúmica da água no modelo	[Kg/m ³] [Kg/m ³]
ρ_{wp}	Massa volúmica da água no protótipo	[Kg/m ³]

Lista de Abreviaturas e Siglas

CLASH	Crest Level Assessment of coastal Structures by full Scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NR	Nível de Repouso da superfície livre
N-S	Norte-Sul
RMSE	Root-Mean-Square Error
SE	Sudeste
SSW-NNE	Sul Sudoeste–Nor Nordeste
SW	Sudoeste
TOT	Todo O Tamanho
UNL	Universidade Nova de Lisboa
USACE	U. S. Army Corps of engineers
ZH	Zero Hidrográfico

Índice

1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos e metodologia	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	1
2. O Galgamento.....	3
2.1. Considerações gerais	3
2.2. Fatores que condicionam o galgamento.....	4
2.2.1. <i>Agitação marítima</i>	4
2.2.2. <i>Nível de maré</i>	6
2.2.3. <i>Geometria da estrutura</i>	6
2.3. Métodos de cálculo do galgamento.....	9
2.3.1. <i>Introdução</i>	9
2.4. Escolha da lei de semelhança e da escala num modelo físico.....	10
3. Caso de Estudo	13
3.1. Protótipo.....	13
3.2. Modelo Físico	15
3.2.1. <i>Instalação experimental</i>	15
3.2.2. <i>Estrutura ensaiada</i>	16
3.2.3. <i>Medições efetuadas e instrumentação</i>	17
3.2.4. <i>Condições de agitação e nível de maré</i>	18
4. Apresentação e Análise de Resultados	20
4.1. Considerações gerais	20
4.2. Apresentação de resultados	24
4.2.1. <i>Ensaios sem estrutura</i>	24
4.2.2. <i>Ensaios com estrutura</i>	26
4.3. Análise de resultados.....	29
4.3.1. <i>Ensaios sem estrutura</i>	29
4.3.2. <i>Ensaios com estrutura</i>	31
5. Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros.....	37
Bibliografia.....	39

Índice das figuras

Figura 2-1. Espraiamento da onda sobre o talude e galgamento (adaptado de Sabino et al., 2014)	3
Figura 2-2. Rebentação Progressiva (USACE, 2006).....	5
Figura 2-3. Rebentação Mergulhante (USACE, 2006).....	5
Figura 2-4. Rebentação Colapsante (USACE, 2006).....	5
Figura 2-5. Rebentação de Fundo (USACE, 2006).....	6
Figura 2-6. Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura, β (http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx)	6
Figura 2-7. Descrição de alguns dos parâmetros característicos da estrutura que influenciam o galgamento (Patrício, 2012)	7
Figura 2-8. Exemplos de tipos de blocos existentes em estruturas marítimas (Pita, 1984)	8
Figura 2-9. Perfis transversais dos quatro tipos de quebra-mares (Pita, 1984)	9
Figura 3-1. Vista aérea dos quebra-mares Poente e Nascente do Porto de Pesca de Albufeira (Patrício, 2012)	13
Figura 3-2. Quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.....	13
Figura 3-3. (A) Imagem da área do Porto de Pesca de Albufeira (Dider et al., 2011) (B) Secção transversal sobre a qual incidiu o estudo do quebra-mar	14
Figura 3-4. Perfil em estudo do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.....	15
Figura 3-5. Canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.....	15
Figura 3-6. Representação esquemática do perfil longitudinal do canal com estrutura ensaiada, escala 1:30 (Neves et al., 2012)	16
Figura 3-7. Perfil transversal da estrutura experimental finalizada	16
Figura 3-8. Aspeto da construção do modelo e do enrocamento utilizado no núcleo e filtros do quebra-mar	17
Figura 3-9. Posição das sondas ao longo do canal, perfil longitudinal (Neves et al., 2010)	17
Figura 3-10. Aspeto das sondas colocadas no interior do manto poroso, G8 a G10	18
Figura 4-1. Computador e Spider localizados perto do canal de ensaios	20
Figura 4-2. Emparelhamento das 8 repetições da sonda G4 no programa Tecplot, sem nenhum tratamento de dados (T=10 s e H=4.0 m).....	21
Figura 4-3. Emparelhamento das 8 repetições da sonda G4 no programa Tecplot, com o ajuste da escala de tempo pela 4ª onda (T=10 s e H=4.0 m)	21
Figura 4-4. Zoom do acerto na 4ª onda das 8 repetições do ensaio T=10 s e H=4.0 m na sonda G4.....	21
Figura 4-5. Escolha das 4 melhores repetições eliminam-se as ondas que fogem nitidamente ao alinhamento (ex: ondas representadas a laranja).....	22
Figura 4-6. Exemplo representativo da série temporal valores do RMSE em cada sonda para o ensaio com T=12 s e H=4.5 m.....	23
Figura 4-7. Exemplo representativo da série temporal da superfície livre na sonda G10 para o ensaio com T=12 s e H=4.5 m.....	23
Figura 4-8. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda x, para o período T= 12 s, variando a altura de onda H	29
Figura 4-9. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda x, para a altura de onda H= 4.0 m, variando o período da onda T	30
Figura 4-10. Série temporal da sonda G2, para T=12 s e H=4.0 m	31

Figura 4-11. Série temporal da sonda G4, para $T=12$ s e $H=4.0$ m	31
Figura 4-13. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda, x , para o período $T= 12$ s, variando a altura de onda H	33
Figura 4-14. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda, para a altura de onda $H=$ 4.0 m e diferentes períodos (T)	33
Figura 4-15. Caudal médio galgado, Q , para o período $T= 12$ s, em função da altura de onda, H	34
Figura 4-16. Caudal médio galgado, Q , para a altura de onda $H= 4.0$ m, em função do período, T	35
Figura 4-17. Ocorrência de galgamento durante o ensaio com $H=4.0$ m e $t=12$ s.....	35
Figura 4-18. Série temporal da sonda G2, para $T=12$ s e $H=4.0$ m	36
Figura 4-19. Série temporal da sonda G6, zona de rebentação, para $T=12$ s e $H=4.0$ m.....	36

Índice das tabelas

Tabela 1. Posição das sondas no canal tendo o pé da estrutura como referência	18
Tabela 2. Condições de agitação dos ensaios realizados (valores de protótipo)	18
Tabela 3. Exemplo representativo de um ficheiro de saída do programa SAM_16AI e dos resultados extraídos (ensaio sem estrutura, 7 sondas)	23
Tabela 4. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=12$ s e $H=3.5$ m (valores do modelo)	24
Tabela 5. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=12$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	24
Tabela 6. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=12$ s e $H=4.5$ m (valores do modelo)	24
Tabela 7. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=12$ s e $H=5.0$ m (valores do modelo)	25
Tabela 8. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=12$ s e $H=5.5$ m (valores do modelo)	25
Tabela 9. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=10$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	25
Tabela 10. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T=14$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	25
Tabela 11. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=12$ s e $H=3.5$ m (valores do modelo)	26
Tabela 12. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=12$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	26
Tabela 13. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=12$ s e $H=4.5$ m (valores do modelo)	27
Tabela 14. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=12$ s e $H=5.0$ m (valores do modelo)	27
Tabela 15. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=12$ s e $H=5.5$ m (valores do modelo)	27
Tabela 16. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=10$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	28
Tabela 17. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T=14$ s e $H=4.0$ m (valores do modelo)	28
Tabela 18. Comparação de H_m para $T=12$ s com respetiva variação H para ensaios com e sem estrutura	32
Tabela 19. Comparação de H_m para $H=4.0$ m com respetiva variação de T para ensaios com e sem estrutura	33
Tabela 20. Caudal Q em função das condições de onda (valores no protótipo)	34

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

Portugal é um país com uma longa faixa costeira, estando esta constantemente ameaçada pela perigosidade das intempéries marítimas. Devido a esta realidade, existe a necessidade de proteger a costa nacional para uma realização sustentável de atividades económicas, como a portuária. A segurança destas zonas está dependente maioritariamente de estruturas marítimas que as protegem, nomeadamente contra o fenómeno do galgamento.

O fenómeno do galgamento de uma estrutura marítima é definido pela passagem de água sobre o coroamento da estrutura por efeito da agitação marítima. Uma consequência do galgamento pode ser o arraste de pessoas, equipamentos, destruição de embarcações ou mesmo a destruição da própria estrutura. Allsop *et al.* (1996) indica que, em cada ano, são notificadas 2 a 4 mortes por acontecimentos relacionados com o galgamento no Reino Unido e em Itália.

Dada a sua importância, o galgamento é levado em consideração no dimensionamento da estrutura. Assim, no projeto de uma estrutura de proteção costeira ou portuária, é considerado um grau de galgamento máximo admissível ou um valor máximo, que varia consoante o tipo de estrutura galgada, as características da zona a proteger e a sua funcionalidade.

Para verificar se o galgamento de uma determinada estrutura é inferior ao limite máximo considerado no projeto, são utilizadas ferramentas empíricas desenvolvidas com base em ensaios laboratoriais. Em obras de grande importância são realizados ensaios específicos em modelo físico, para a confirmação do comportamento das obras no que se refere ao galgamento.

1.2. Objetivos e metodologia

O objetivo geral deste trabalho é estudar o fenómeno do galgamento em estruturas marítimas, focando-se na determinação do galgamento para o caso do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira.

Para tal, procedeu-se a:

- Realização de ensaios em modelo físico num canal de ondas do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), à escala de 1:30, para diferentes condições de onda regular.
- Medição da superfície livre e do volume galgado durante os ensaios para posterior análise e cálculo do galgamento para cada caso.
- Análise de resultados e respetivas conclusões.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, aos quais se acrescentou a bibliografia.

Após esta introdução (Capítulo 1), no Capítulo 2 é definido o fenómeno do galgamento evidenciando as suas principais características e condicionantes.

No Capítulo 3 faz-se a descrição do caso em estudo, dando relevo à sua importância e enquadramento à modelação física correspondente, nomeadamente a apresentação da instalação experimental, a caracterização da estrutura ensaiada, a descrição das medições efetuadas e instrumentação utilizada e, finalmente, as condições de teste.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos no âmbito desta dissertação e a respetiva análise.

O Capítulo 5 contém as principais conclusões do estudo e recomendações para futuros desenvolvimentos.

2. O Galgamento

2.1. Considerações gerais

O galgamento é um fenómeno de transmissão de energia inserido num conjunto de processos de interação onda-estrutura, que ocorre quando existe uma passagem de água sobre o coroamento de uma estrutura marítima por efeito da agitação marítima.

Quando a onda interage com uma estrutura, parte da sua energia é refletida, parte é transmitida e outra ainda é dissipada. A energia é dissipada por rebentação, por atrito ou por percolação. A energia é transmitida através do meio poroso, no caso de estruturas permeáveis, e por galgamento.

Em estruturas em talude, o galgamento dá-se quando a cota de coroamento, R_c , não é suficientemente alta e o nível máximo de espraio, R , ultrapassa esta cota, havendo, deste modo, um transporte de massa de água sobre o coroamento da obra (Figura 2-1). Assim, diretamente relacionado com o galgamento está o fenómeno do espraio, R , definido como a cota máxima atingida por uma onda quando embate na estrutura, localizada a uma profundidade h . Considera-se como cota de referência o nível de repouso da superfície livre, NR .

O fenómeno do galgamento pode ser expresso através do volume, V (m^3), da massa de água que galga a estrutura, ou através do caudal médio por metro linear do coroamento da estrutura, Q ($m^3/s/m$ ou $l/s/m$).

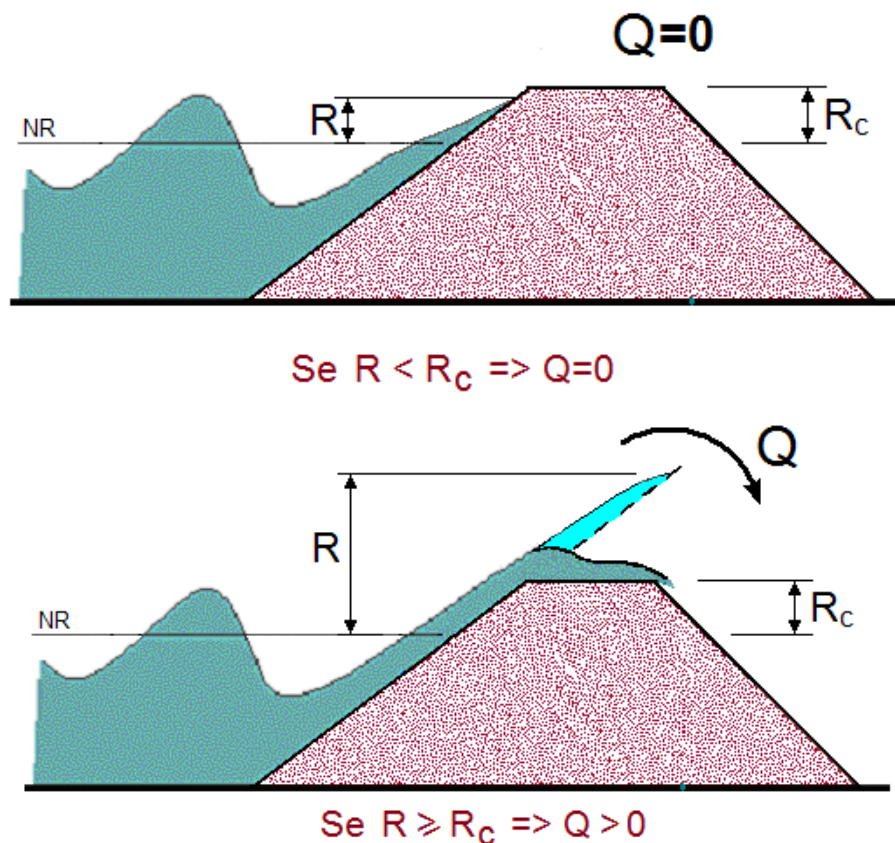


Figura 2-1. Espraio da onda sobre o talude e galgamento (adaptado de Sabino et al., 2014)

O galgamento é, portanto, um fator condicionante para o dimensionamento de obras marítimas, uma vez que influencia a determinação da cota de coroamento, influenciando assim o custo, eficiência e impacto visual da obra.

A transposição por massas de água associadas a este fenómeno em estruturas de proteção costeira e portuária pode provocar graves danos, nomeadamente quando existe uma simultaneidade da ocorrência de temporais com sobrelevações do nível do mar. Exemplo desses danos devido ao galgamento de estruturas marítimas são o arrastamento de pessoas, inundações e outros prejuízos nas zonas envolventes às mesmas.

Assim, no dimensionamento de obras marítimas é definido um grau ou valor de galgamento admissível, tendo em conta os aspetos construtivos, económicos e de funcionalidade, sendo este último fator decisivo na variação do referido grau ou valor máximo admissível.

Os aspetos construtivos e económicos estão interligados, uma vez que quanto menor for o grau ou valor de galgamento permitido, mais elevada terá de ser a cota de coroamento da estrutura e, consequentemente, maior o custo de construção.

Quanto à funcionalidade, esta depende do objetivo da obra, sendo o caudal de galgamento permitido para uma zona de utilização pedonal necessariamente menor do que o galgamento passível de ocorrer num molhe de proteção da entrada de um porto.

A avaliação do galgamento é um processo complexo, que deve ser efetuada especificamente para cada situação, em função das características da agitação marítima que solicita a estrutura, dos diferentes tipos de soluções construtivas, dos diferentes materiais utilizados, entre outros fatores.

2.2. Fatores que condicionam o galgamento

2.2.1. *Agitação marítima*

O principal fator condicionante do galgamento de uma determinada estrutura é a agitação marítima, como já foi referido anteriormente. A agitação marítima pode ser caracterizada pela altura de onda, o período e a direção de propagação.

Com base nestes três parâmetros, podem-se definir outros, também importantes. A declividade da onda (s), relaciona a altura de onda, H , com o comprimento de onda, L , e é dada por:

$$s = \frac{H}{L} \quad (2.1)$$

onde L é dado por:

$$L = \frac{g T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.2)$$

sendo g a aceleração da gravidade (USACE, 2006), T o período da onda e h a profundidade. No caso de águas profundas, a equação pode ser simplificada e o comprimento de onda ao largo, L_0 , passa a ser apenas função do período:

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi} \quad (2.3)$$

Para avaliar a forma como a onda rebenta sobre a estrutura utiliza-se normalmente o número de Iribarren (ξ). Este parâmetro relaciona o declive do talude da estrutura (ou da praia), α , com a declividade da onda, s .

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.4)$$

Para valores do número de Iribarren inferiores a 0.5 ($\xi < 0.5$), a rebentação da onda é Progressiva (Figura 2-2), levando a que a crista se deforme e destabilize, criando uma leve espuma sobre o talude. Este tipo de rebentação ocorre frequentemente em praias de declive suave.

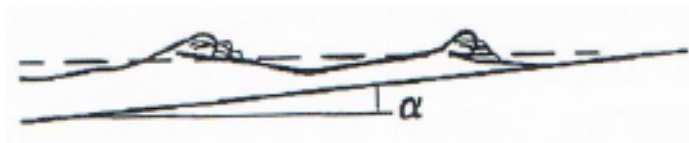


Figura 2-2. Rebentação Progressiva (USACE, 2006)

Para valores de Iribarren entre 0.5 e 3 ($0.5 < \xi < 3$), a crista da onda cria uma curvatura e cai sobre o talude originando grandes salpicos, sendo a rebentação designada por rebentação Mergulhante (Figura 2-3).



Figura 2-3. Rebentação Mergulhante (USACE, 2006)

Para valores do número de Iribarren de aproximadamente 3 a 3.5 ($\xi > 3$ a 3.5) diz-se que a rebentação é Colapsante (Figura 2-4). Este tipo de rebentação surge do cruzamento entre os dois tipos de rebentação referidos anteriormente, onde a crista não rebenta inteiramente, não origina grandes salpicos, mas cria-se uma espuma que se estende pelo talude.



Figura 2-4. Rebentação Colapsante (USACE, 2006)

Considera-se ainda o caso em que a onda apresenta pouca declividade, ou seja, elevado número de Iribarren ($\xi > 3.5$), deforma-se e espraia sobre o talude, avançando sem rebentar. Estas ondas apresentam rebentação de Fundo e uma forte reflexão (Figura 2-5).



Figura 2-5. Rebentação de Fundo (USACE, 2006)

O ângulo de incidência das ondas, β , que influencia o fenômeno do galgamento é medido pelo ângulo entre a direção de propagação das ondas e a direção perpendicular à estrutura (Figura 2-6). Assim, às ondas com incidência perpendicular à estrutura corresponde um valor de $\beta = 0^\circ$.

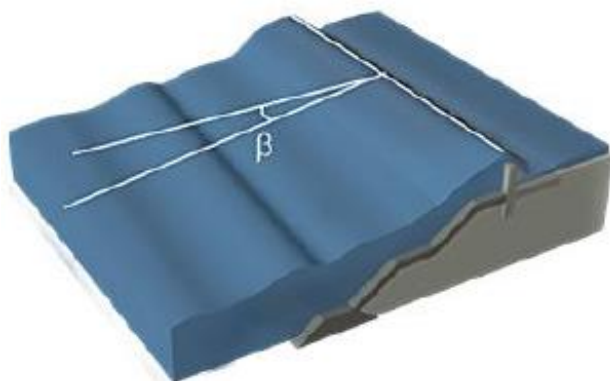


Figura 2-6. Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura, β (<http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>)

2.2.2. *Nível de maré*

O galgamento é bastante influenciado pelo nível de maré. Em geral, o galgamento é mais intenso para os maiores níveis de maré e quando se conjuga com situações de tempestade.

Ao embater na estrutura a onda tende a espalhar-se pelo talude, dissipando grande parte da sua energia. Em preia-mar, a distância entre o nível de repouso da superfície livre e a cota de coroamento é menor do que em condições de baixa-mar. Assim, em preia-mar existe uma menor área de talude emersa, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de galgamentos, uma vez que grande parte da energia não é dissipada no espalhamento.

2.2.3. *Geometria da estrutura*

É através da geometria da estrutura que existe a possibilidade de controlar e reduzir o galgamento. Para a definição da geometria da estrutura, o parâmetro relevante para o galgamento é a distância entre o coroamento da parte impermeável da estrutura e o nível de repouso, R_c . Outros parâmetros característicos da estrutura que também influenciam os galgamentos são a rugosidade e a permeabilidade da eventual berma de coroamento e do talude, a largura da berma do coroamento, G_c , a inclinação do talude, α , e a configuração da superestrutura.

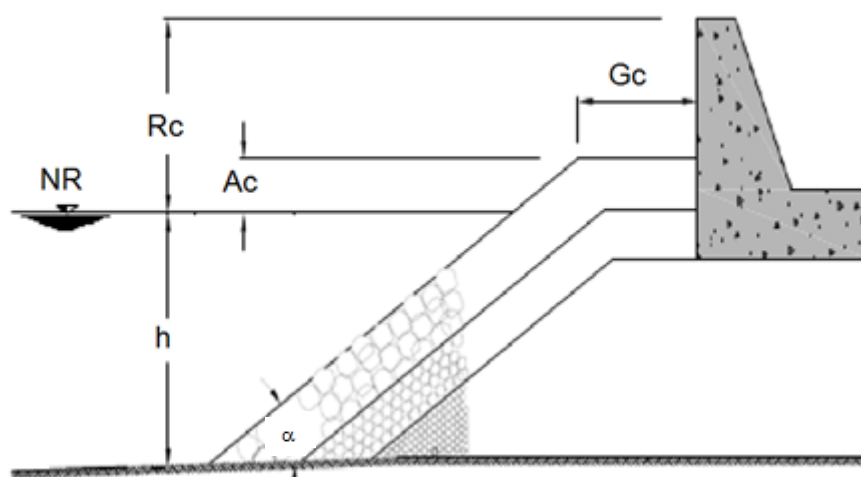


Figura 2-7. Descrição de alguns dos parâmetros característicos da estrutura que influenciam o galgamento (Patrício, 2012)

Os parâmetros indicados são os seguintes:

- Ac - distância entre o nível de repouso e a berma de coroamento da estrutura;
- Gc - largura da berma de coroamento da estrutura;
- h - profundidade em frente à estrutura;
- NR - nível de repouso da superfície livre;
- Rc - altura de coroamento da parte impermeável da estrutura acima do nível de repouso;
- α - ângulo do talude com a horizontal.

A solução mais vantajosa, com vista a reduzir os danos provocados pela ocorrência do galgamento, seria adotar estruturas com elevadas cotas de coroamento. No entanto, esta solução, requiere maiores custos (mais material, mão-de-obra, etc.) e origina um impacto visual acrescido, que muitas vezes, em zonas sensíveis em termos ambientais e turísticos, pode comprometer a sua viabilidade. A cota de coroamento torna-se assim um fator decisivo, sendo calculada para uma determinada probabilidade de excedência, tendo em conta diversos elementos.

A rugosidade e a permeabilidade são características relacionadas com o tipo de material que constitui os mantos da estrutura e a sua disposição construtiva. O tipo de material a utilizar pode ser de enrocamento (blocos de enrocamento) ou de betão (blocos artificiais de betão), que podem ter diversas formas (Figura 2-8).

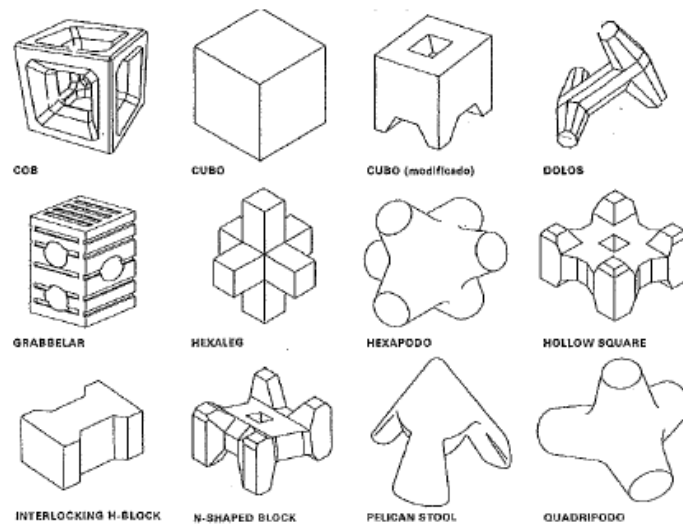


Figura 2-8. Exemplos de tipos de blocos existentes em estruturas marítimas (Pita, 1984)

Quando se adota uma superestrutura, esta é caracterizada por uma configuração vertical (Figura 2-7) ou em curva, permitindo, esta última, em alguns casos, o retorno da onda incidente e consequentemente um menor galgamento.

O ângulo de inclinação do talude, α (

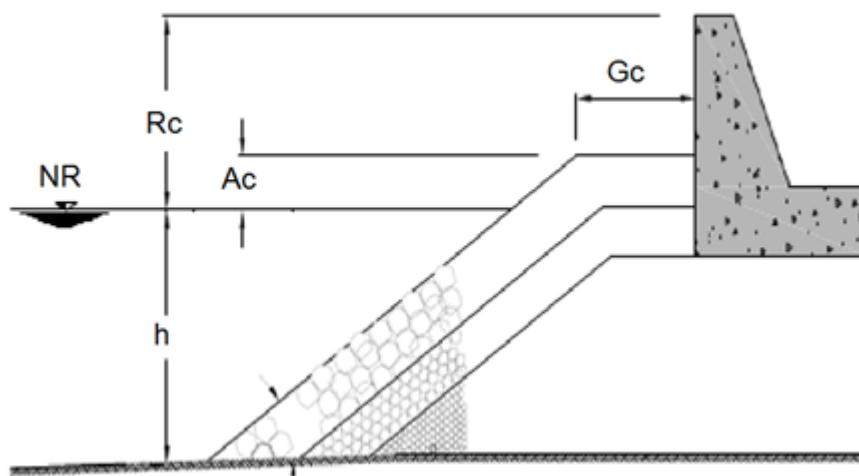


Figura 2-7), tem representatividade no número de Iribarren, que relaciona a geometria do talude com a geometria da onda.

Quanto ao perfil transversal da estrutura, podemos distinguir (Figura 2-9):

- os quebra-mares verticais, que possuem paramento vertical impermeável que reflete a energia da onda sem que ocorra rebentação. São estruturas robustas de modo a suportar o impacto direto da ondulação.
- os quebra-mares de talude, que possuem um perfil transversal semelhante a um trapézio e dissipam a maior parte da energia das ondas por atrito e percolação por meios porosos.

- os quebra-mares mistos, que têm um comportamento semelhante aos quebra-mares de talude até um determinado nível de água, a partir do qual começam a ter um comportamento de um quebra-mar vertical.
- os quebra-mares de estrutura mista, semelhantes aos quebra-mares de talude, possuindo no topo uma estrutura de dimensão considerável com o intuito de refletir a água que a atinge.

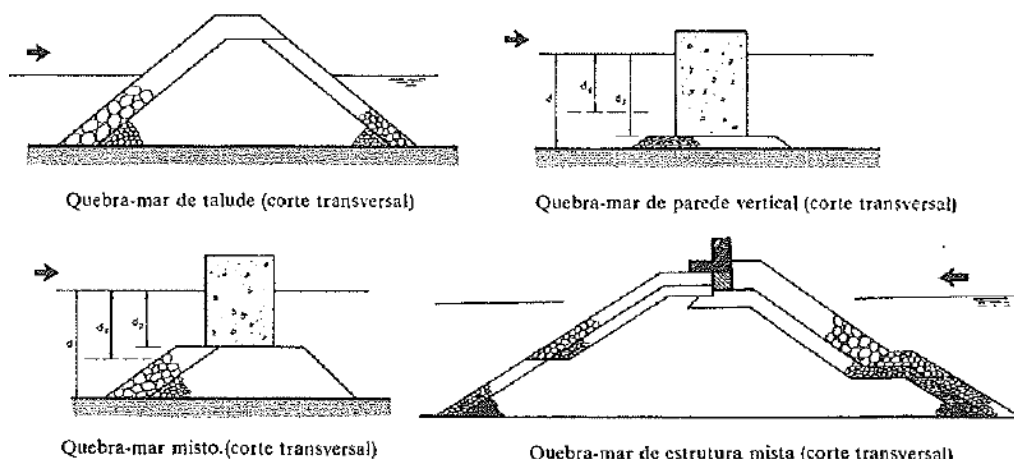


Figura 2-9. Perfis transversais dos quatro tipos de quebra-mares (Pita, 1984)

2.3. Métodos de cálculo do galgamento

2.3.1. Introdução

Como já foi referido anteriormente, o galgamento de uma estrutura marítima é um fenómeno complexo e de elevada dificuldade de quantificação, sendo de destacar a elevada importância da experiência acumulada pelos projetistas para a conceção da estrutura, sendo importante que estas causem baixo impacto ambiental e visual, sendo ao mesmo tempo económicas e eficientes na dissipação da energia das ondas e na redução consequente do galgamento.

Ao longo dos anos foram surgindo vários métodos de cálculo, de diferentes complexidades e rapidez de execução. São utilizadas expressões empíricas, tais como Besley (1999) e Pullen *et al.* (2007), ou expressões semi-empíricas, tais como Hedges e Reis (1998, 2004).

Podemos definir expressão empírica como o ajuste de uma curva a dados do modelo, usando, por exemplo, o método dos ajustes ou dos mínimos quadrados. As expressões semi-empíricas são deduzidas a partir de considerações teóricas e calibradas com base em resultados provenientes de modelos físicos.

De destacar que a aplicabilidade das expressões apenas é válida para condições específicas, consideradas nos ensaios de base, nos parâmetros da agitação marítima, nível de maré e configurações da própria estrutura.

Por outro lado, as redes neuronais, que também são ferramentas empíricas, têm ganho um importante destaque na determinação do galgamento (e.g. Wedge *et al.*, 2005). No âmbito do

Programa Europeu CLASH, foi desenvolvida a ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2, baseada na análise de 700 redes neurais (Coeveld *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005). De destacar que Coeveld *et al.* (2005) recomendam que os resultados desta ferramenta sejam verificados através de modelação física, o que significa que são resultados preliminares, a utilizar em fase de Programa Base/Estudo Prévio.

O uso de modelos numéricos é cada vez mais atrativo. Para este facto tem contribuído o desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, mas também o facto de serem mais flexíveis que os modelos físicos e as fórmulas, já que, após serem calibrados, podem ser aplicados a uma grande gama de configurações de estrutura e agitação. Os modelos mais recentes são os mais completos, mas a sua aplicação ainda é limitada devido ao elevado tempo de cálculo que exigem. Os requisitos de precisão e de eficiência do ponto de vista computacional não podem ser atributos, até agora, em simultâneo a um só modelo numérico, sendo que cada modelo disponível apenas reúne parte destes requisitos.

Os ensaios em modelo físico ainda continuam a ser o método mais fiável para calcular o galgamento, evitando incorretos dimensionamentos da estrutura. Os ensaios são comuns utilizarem-se na fase de Projeto de Execução. A modelação física é dispendiosa e morosa, exigindo infraestruturas específicas no laboratório e elevada experiência na recolha e tratamento de dados.

2.4. Escolha da lei de semelhança e da escala num modelo físico

A semelhança entre o modelo físico reduzido e o protótipo pode ser traduzida através, nomeadamente, de semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica de todas as solicitações atuantes no protótipo (à escala real) e no modelo. Em modelos de hidráulica marítima, podem considerar-se como forças dominantes as de gravidade e de pressão, sendo que, tanto a viscosidade do fluido (água) como a tensão superficial podem ser consideradas desprezáveis face às anteriores. Por isso, neste tipo de modelos, é comumente utilizada a lei de semelhança de Froude.

Assumindo esta lei, determina-se a correspondência entre as massas dos blocos no modelo e no protótipo, assegurando-se que o número de estabilidade, N_s , é o mesmo no modelo e no protótipo. As diferenças da massa volúmica da água (água salgada no protótipo - 1025 kg/m^3 - e água doce no modelo - 1000 kg/m^3) e da massa volúmica das unidades do manto de proteção são tidas em conta neste parâmetro (HYDRALABIII Consortium (2007)). O número de estabilidade é definido como:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (2.5)$$

onde:

H_s = altura significativa de onda (m)

Δ = massa volúmica relativa = $(\rho_a - \rho_w) / \rho_w$ (-)

ρ_a = massa volúmica dos blocos de proteção (kg/m^3)

ρ_w = massa volúmica da água (kg/m^3)

D_n = diâmetro nominal dos blocos de proteção $= \sqrt[3]{M/\rho_a}$ (m)

M = massa do bloco (Kg)

A estabilidade dos blocos de proteção é modelada corretamente quando o valor de N_s no modelo e no protótipo é o mesmo. A eq. (2.5) pode ser resolvida para determinar a escala do modelo usando aquela relação. A escala do modelo (λ) é determinada pelo quociente entre a altura de onda no protótipo e a altura de onda no modelo. Quando a massa e a massa volúmica dos blocos de proteção são conhecidas, a escala do modelo pode ser determinada a partir de:

$$\lambda = \frac{H_{s_p}}{H_{s_m}} = \frac{\Delta_p}{\Delta_m} \cdot \left(\frac{M_p}{M_m} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho_{am}}{\rho_{ap}} \right)^{1/3} \quad (2.6)$$

Os índices m e p referem-se aos valores do modelo e do protótipo, respetivamente.

Para os parâmetros mais relevantes usados no modelo físico, os fatores de escala são os seguintes:

- Comprimento (m): λ
- Volume (m³): λ^3
- Tempo (s): $\lambda^{0.5}$
- Massa (kg): λ^3
- Galgamento (l/s/m): $\lambda^{1.5}$

Assim, para converter uma distância L do protótipo (L_p) para o modelo (L_m) procede-se da seguinte maneira:

$$L_m = L_p / \lambda \quad (2.7)$$

Para converter um volume V do protótipo (V_p) para a escala do modelo (V_m) utiliza-se a fórmula:

$$V_m = \frac{V_p}{\lambda^3} \quad (2.8)$$

Para converter o período do protótipo (T_p) para o modelo (T_m) utiliza-se a seguinte fórmula:

$$T_m = \frac{T_p}{\lambda^{0.5}} \quad (2.9)$$

Para converter a massa dos blocos do protótipo (M_p) para o modelo (M_m) utiliza-se a seguinte fórmula:

$$M_m = \frac{M_p}{(\lambda^3)} \left(\frac{\rho_{wm}}{\rho_{wp}} \right) \quad (2.10)$$

sendo ρ_{wm} a massa volúmica da água no modelo e ρ_{wp} a massa volúmica no protótipo.

Para converter o caudal médio de galgamento Q do protótipo (Q_p) para o modelo (Q_m) utiliza-se a seguinte fórmula:

$$Q_m = \frac{Q_p}{\lambda^{1.5}} \quad (2.11)$$

3. Caso de Estudo

3.1. Protótipo

O caso de estudo nesta dissertação diz respeito ao quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, que tem sido alvo de estudo no âmbito do projeto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, envolvendo o LNEC e a Universidade do Algarve. Este estudo centra-se no galgamento deste quebra-mar e incluiu campanhas de campo, ensaios em modelo físico e modelação numérica. Esta dissertação insere-se no âmbito dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos pela equipa do projeto (Didier *et al.*, 2011 e Ferreira *et al.*, 2013) e apresenta os ensaios realizados no âmbito deste projeto.

A construção deste porto teve início em 1999, terminando em 2002. O porto possui duas obras marítimas principais de proteção: o quebra-mar Poente e o quebra-mar Nascente, que está fora do âmbito deste trabalho (Figura 3.1 e Figura 3.2).



Figura 3-1. Vista aérea dos quebra-mares Poente e Nascente do Porto de Pesca de Albufeira (Patrício, 2012)



Figura 3-2. Quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira

O quebra-mar Poente possui um comprimento de 275 m e representa a única proteção do porto contra a agitação marítima vinda de SW e possui estruturalmente 5 perfis-tipo.

A secção em estudo (Figura 3-3) caracteriza-se por um talude exterior com um declive de 3:1.6 e desenvolve-se entre a cota +7.0 m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5 m (Figura 3-4) encontra-se fundeada a -3.0 m (ZH). É protegida por enrocamentos de 90 a 120 kN dispostos em duas camadas, tendo como filtros duas camadas de enrocamentos de 10 a 30 kN. O talude interior, inclinado a 3:2, desenvolve-se entre a cota +6.5 m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural 0.5 m. É igualmente protegido por enrocamentos de 90 a 120 kN entre o coroamento e o ZH e por enrocamento de 10 a 30 kN entre o ZH e uma cota que dista do fundo natural 0.5 m. A fundação do talude processa-se sobre um tapete de TOT com 0.5 m de espessura. Quer a berma de coroamento exterior (à cota +7.0 m (ZH)), quer a berma de coroamento interior (à cota +6.5 m (ZH)), têm cerca de 5.9 m de largura. Na zona central do coroamento desenvolve-se um passadiço de betão armado com 3.0 m de largura, com coroamento à cota +6.5 m (ZH) e fundação à cota +4.0 m (ZH). É de referir que os blocos do manto resistente apresentam uma extrema arrumação, aspeto que nem sempre é recomendado em obras marítimas, particularmente em obras muito expostas à agitação marítima (Dider *et al.*, 2011).



Figura 3-3. (A) Imagem da área do Porto de Pesca de Albufeira (Dider *et al.*, 2011) (B) Secção transversal sobre a qual incidiu o estudo do quebra-mar

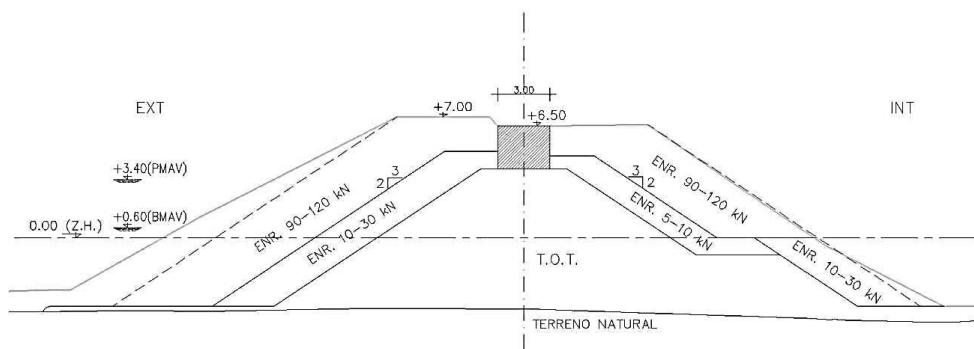


Figura 3-4. Perfil em estudo do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira

3.2. Modelo Físico

3.2.1. Instalação experimental

Os ensaios efetuados para a elaboração desta dissertação foram realizados num canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:30. Esta escala foi selecionada de forma a garantir que:

- Os principais aspetos da interação onda-estrutura (reflexão, dissipação e transmissão, especialmente por galgamento) eram bem reproduzidos no modelo;
- Eram evitados efeitos de escala significativos, especialmente no que se refere à reprodução da rebentação e do escoamento nos mantos da estrutura;
- As condições de ensaio definidas podiam ser reproduzidas na instalação de ensaio (canal) com os recursos disponíveis.

O canal apresenta, na sua totalidade, um comprimento de 49.4 m para uma largura constante de 1.6 m e altura de 1.2 m (Figura 3-5).



Figura 3-5. Canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Foi reproduzida experimentalmente a secção transversal do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira (Figura 3-6), que se descreve na secção seguinte. Os fundos em frente à secção são constituídos por uma rampa de 13.96 m de comprimento e uma zona horizontal de 23.04 m. O declive é de 2.1% até ao início da estrutura. A distância entre o sopé do quebra-mar e do batedor (tipo pistão) é de 37.0 m. Foi considerado um nível de água constante de 0.51 m junto ao batedor, equivalente a 0.217 m no pé da estrutura, representando no protótipo um nível de maré de +3.5 m (ZH).

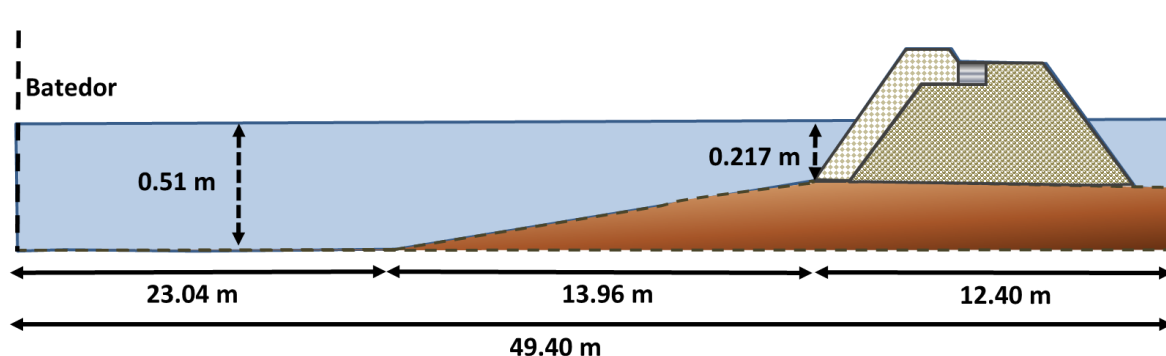


Figura 3-6. Representação esquemática do perfil longitudinal do canal com estrutura ensaiada, escala 1:30 (Neves *et al.*, 2012)

3.2.2. Estrutura ensaiada

A estrutura ensaiada representativa da secção do perfil transversal do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira (Figura 3-7), é a correspondente à secção descrita no ponto 3.1. Note-se que a porosidade do manto é considerada baixa devido ao elevado nível de arrumação dos blocos.

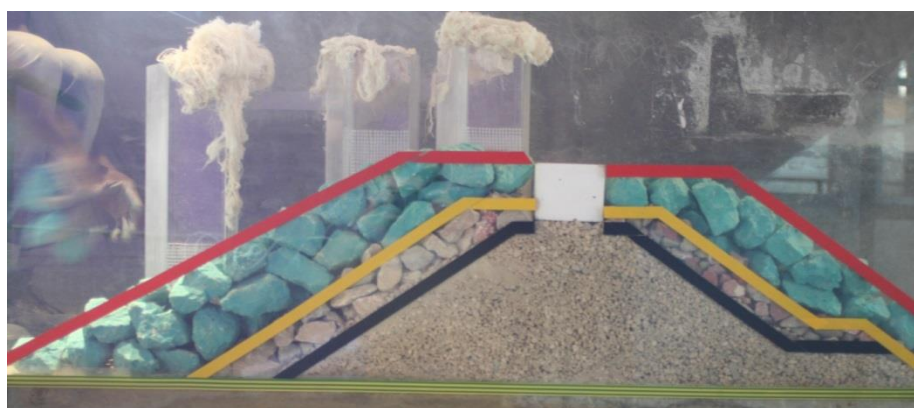


Figura 3-7. Perfil transversal da estrutura experimental finalizada

Para a construção do modelo experimental, e de acordo com as características do perfil que se pretende representar, foi utilizado enrocamento de diferente granulometria, sendo o de menor granulometria utilizado no núcleo, o de granulometria intermédia utilizado nos filtros e a de maior granulometria utilizado no manto resistente, tal como está representado na Figura 3-7.

Na Figura 3-8 podemos observar a evolução da colocação do enrocamento do filtro frontal sobre o enrocamento do núcleo. Estão também representadas na imagem algumas das caixas protetoras das sondas no modelo. Estas caixas têm a função de separar e proteger as sondas no enrocamento do manto exterior e filtros frontais, de maneira a facilitar os registos da variação da superfície livre. A sua geometria foi definida de forma a reduzir o impacto das mesmas no escoamento e, consequentemente, no galgamento da estrutura. Além disso, relativamente à secção transversal do canal, a sua posição não coincide com a secção de medição do galgamento.



Figura 3-8. Aspeto da construção do modelo e do enrocamento utilizado no núcleo e filtros do quebra-mar

3.2.3. Medições efetuadas e instrumentação

Ao longo do canal foram instaladas 10 sondas resistivas para medir a elevação da superfície livre em 10 posições, tanto ao longo do canal como no interior do manto exterior e no coroamento (Figura 3-9 **Error! Reference source not found.**).

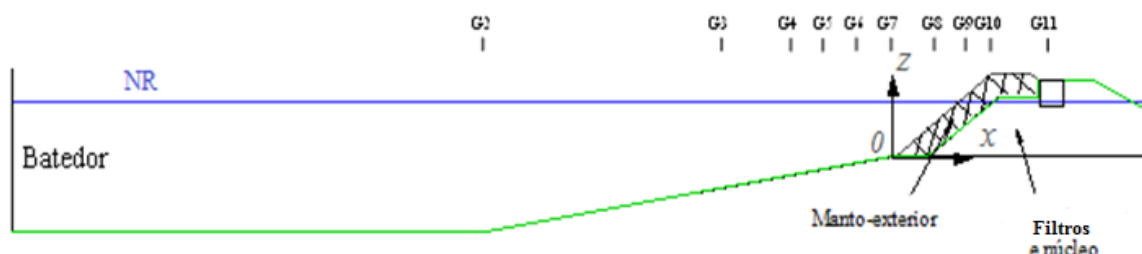


Figura 3-9. Posição das sondas ao longo do canal, perfil longitudinal (Neves *et al.*, 2010)

Na Tabela 1 estão indicadas as posições no canal das sondas de nível, G1/G2 a G11. A sonda G1 encontra-se à mesma distância que a sonda G2, mas num canal paralelo, livre de estrutura. A sonda G1 tem como finalidade verificar a qualidade da onda gerada pelo batedor, sem a interferência das ondas que retornam devido à reflexão na estrutura. A posição das sondas está definida tendo como referência o pé do talude (origem do referencial Oxz), **Error! Reference source not found.** A sonda G2 encontra-se no início da rampa e tem também a função de controlar as ondas geradas pelo batedor, embora com influência da reflexão na estrutura. Através das sondas G3 a G7 obtiveram-se séries temporais da elevação da superfície livre a barlar da estrutura. As sondas G8 a G10, que se encontram no interior do manto poroso da estrutura, têm como finalidade medir os níveis de água no manto poroso (Figura 3-7). A sonda G11 foi colocada numa zona impermeável, no

passadiço, para medir o nível de água que galga o passadiço. Foi colocado um limnómetro para medição do nível de água numa caixa, com uma área conhecida, colocada no tardo da estrutura, para permitir o cálculo do volume de água galgada. O caudal médio galgado por metro linear de estrutura é obtido dividindo o volume galgado pelo tempo de ensaio, igual a 60 s, e pela largura da secção de ensaio (0.3 m)

Tabela 1. Posição das sondas no canal tendo o pé da estrutura como referência

Sonda	G1/G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11
Posição x (m)	-13.96	-3.79	-2.53	-2.04	-1.23	-0.06	0.30	0.57	0.75	0.87



Figura 3-10. Aspeto das sondas colocadas no interior do manto poroso, G8 a G10

3.2.4. Condições de agitação e nível de maré

Na realização do trabalho experimental foram considerados ensaios sem e com estrutura e foram reproduzidas nos ensaios ondas regulares para um nível de maré de +3.5 m (ZH), com diferentes valores de altura de onda (H) e de período (T). Foram feitos dois grupos de ensaios (Tabela 2):

- Para $T=12$ s (valor de protótipo), variou-se a altura de onda (3.5 m, 4.0 m, 4.5 m, 5.0 m e 5.5 m);
- Para $H=4$ m (valor de protótipo), variou-se o período (10s, 12s e 14s).

Tabela 2. Condições de agitação dos ensaios realizados (valores de protótipo)

H (m)	T (s)
3.5	12
4.0	
4.5	
5.0	
5.5	

H (m)	T (s)
4.0	10
	12
	14

Os valores de altura de onda e período foram selecionados com base em estudos anteriormente efetuados pelo LNEC e pela Universidade do Algarve (Ferreira *et al.*, 2013).

Estas alturas de onda foram escolhidas para se obterem situações com e sem galgamento.

Na Tabela 4 são apresentados os valores das condições de onda ensaiadas, quer à escala do protótipo, quer à escala do modelo físico.

Tabela 3. Valores de altura e período ensaiados, às escalas do protótipo e do modelo físico

	Protótipo	Modelo
H (m)	3.50	0.12
	4.00	0.13
	4.50	0.15
	5.00	0.17
	5.50	0.18
T (s)	10.00	1.83
	12.00	2.19
	14.00	2.56

4. Apresentação e Análise de Resultados

4.1. Considerações gerais

No início de cada dia de ensaio foram determinadas as constantes de calibração de cada sonda, valores estes fundamentais para a conversão dos valores medidos de voltes para centímetros. As medições da variação do nível da superfície livre em cada sonda foram processadas pelo pacote de software SAM (Capitão, 2002), para simulação, geração e aquisição de sinais produzidos em canais e tanques de ondas. As sondas estavam ligadas a um *Spider* (sistema de aquisição de dados) que transformava os sinais de analógico em digital, e este estava ligado a um computador com o pacote SAM (Figura 4-1) onde eram gravados os ficheiros de dados contendo uma coluna com o tempo, com um espaçamento constante de 0.04 s (frequência de aquisição de 25 Hz), e com as leituras (voltagens) correspondentes a cada sonda.



Figura 4-1. Computador e *Spider* localizados perto do canal de ensaios

Cada condição de ensaio (H, T) foi repetida no mínimo 8 vezes de maneira a serem seleccionadas as quatro melhores representações desse ensaio. Esta situação prende-se como uma garantia para o experimentador da eficiência de toda a componente mecânica e eletrónica do equipamento de geração da onda e do equipamento de receção dos dados inerentes ao ensaio. Caso tenha havido alguma dúvida sobre a veracidade dos valores num dada repetição, o número de 8 repetições do respetivo ensaio foi excedido.

Os ficheiros de saída do programa SAM (no laboratório), foram emparelhados no programa *Tecplot* (Figura 4-2**Error! Reference source not found.**) de forma a ser executado um acerto das sinusoides pela 4ª onda de todas as repetições efetuadas do ensaio (Figura 4-3 e Figura 4-4**Error! Reference source not found.**).

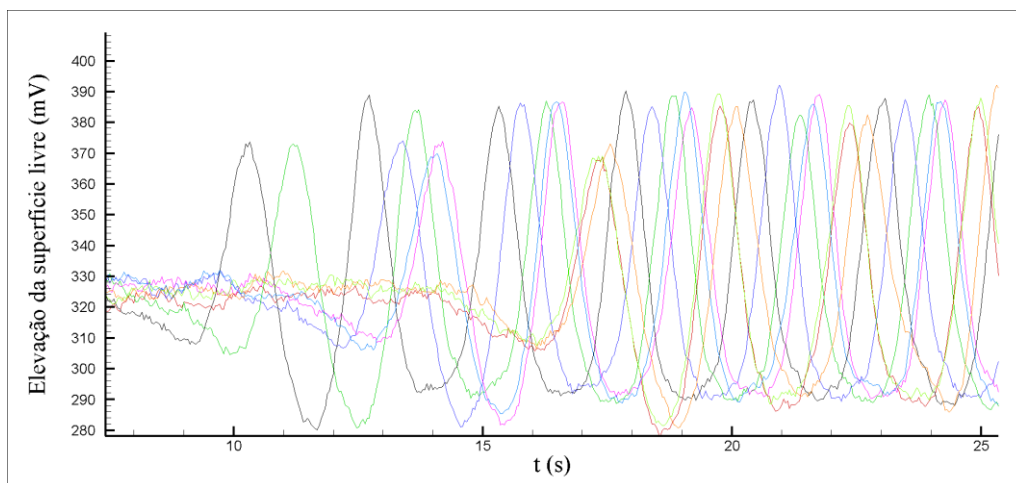


Figura 4-2. Emparelhamento das 8 repetições da sonda G4 no programa *Tecplot*, sem nenhum tratamento de dados ($T=10$ s e $H=4.0$ m)

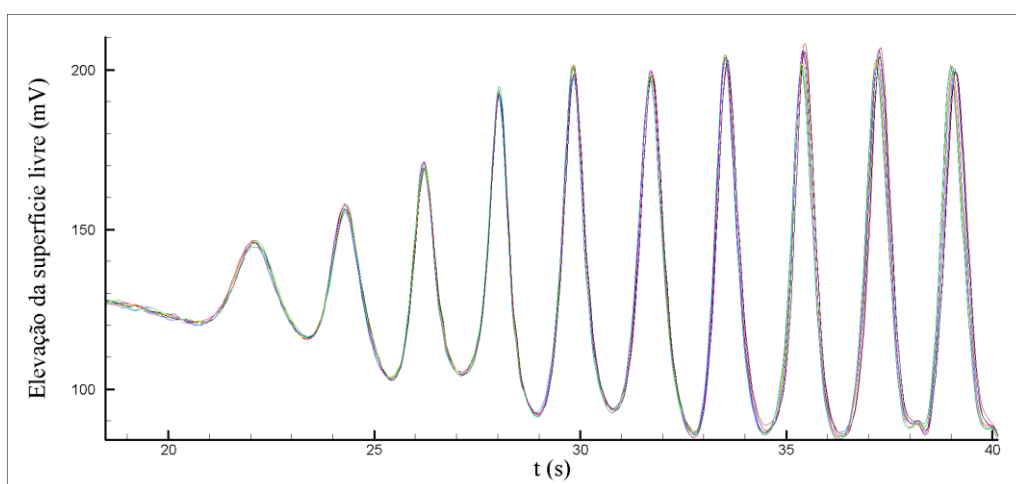


Figura 4-3. Emparelhamento das 8 repetições da sonda G4 no programa *Tecplot*, com o ajuste da escala de tempo pela 4ª onda ($T=10$ s e $H=4.0$ m)

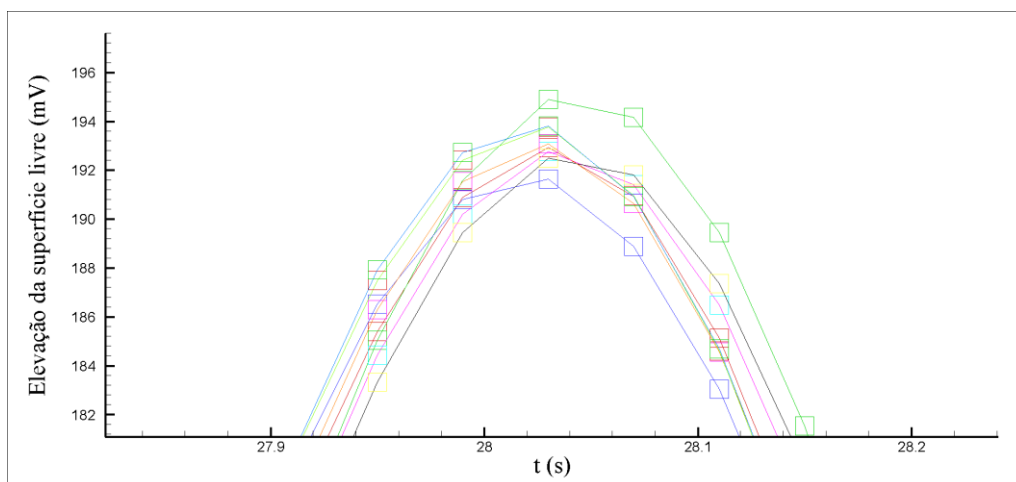


Figura 4-4. Zoom do acerto na 4ª onda das 8 repetições do ensaio $T=10$ s e $H=4.0$ m na sonda G4

Este procedimento deve-se ao facto de os dados dos ensaios terem começado a ser gravados em tempos diferentes, justificando-se tal situação pelo facto do comando de início da gravação ser manual. Justifica-se o acerto pela 4ª onda dado que, nesta altura, já se consideram as ondas estáveis.

Posteriormente, foram escolhidas para cada ensaio as quatro melhores repetições e consideradas as mesmas quatro repetições para cada sonda (Figura 4-5), onde, através de uma análise de dados, foram calculados valores médios RMS e respetivo galgamento.

Cada linha colorida representa a leitura da sonda G4 das diversas ondas durante a totalidade do ensaio. Temos assim a vermelho escuro a primeira repetição, a verde a segunda repetição, a azul-escuro a terceira repetição, a azul claro a quarta repetição, a amarelo a quinta repetição, a rosa a sexta repetição, a vermelho claro a sétima repetição e a verde-claro a oitava e última repetição deste ensaio.

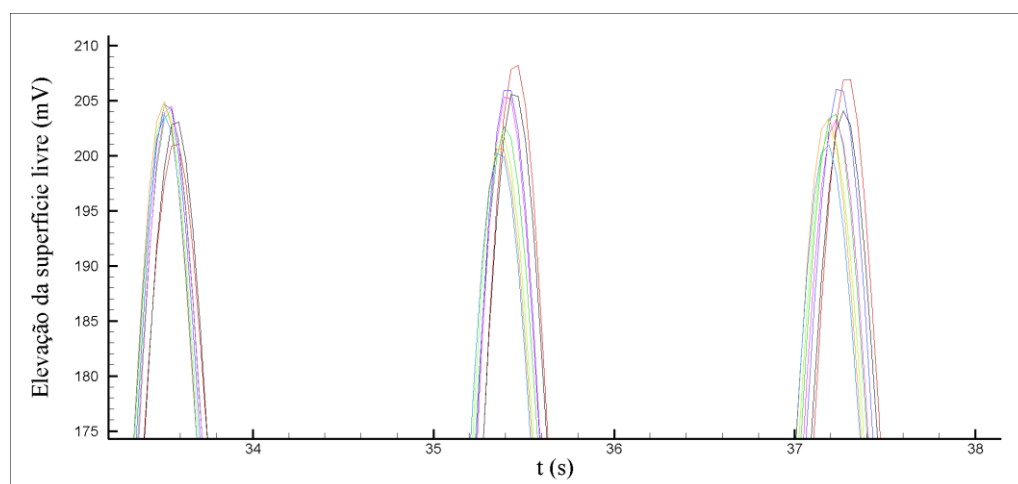


Figura 4-5. Escolha das 4 melhores repetições eliminam-se as ondas que fogem nitidamente ao alinhamento (ex: ondas representadas a laranja)

Em estatística, o Erro quadrático médio é uma forma de avaliar a diferença entre um estimador e o verdadeiro valor da quantidade estimada. O Erro quadrático médio determina a média do quadrado do erro, com o erro sendo o montante pelo qual o estimador difere da quantidade a ser estimada. Tirar a raiz quadrada de Erro quadrático médio produz o Desvio Quadrático Médio, uma boa medida de precisão também conhecida como Média Quadrática (*RMSE*), Figura 4-6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (3.1)$$

onde x_i representa os valores de referência, neste caso, os valores medidos no tempo e em cada sonda, obtidos no ensaio tomado como referência e realizado com um determinado valor de H e T, y_i representa os valores do estimador neste caso, os valores medidos em cada sonda nas várias repetições do ensaio tomado como referência, e n o número de pontos a considerar, isto é, o número de medições efetuadas ao longo de um ensaio.

t (s)	sonda 1	sonda 2	sonda 3	sonda 4	sonda 5	sonda 6	sonda 7	sonda 8	sonda 9	sonda 10	sonda 11	sonda 12
0.01	0.0011148	0.000238	0.000694	0.000645	0.000774	0.000463	0.000428	0.000613	0.000558	0.000486	1.62E-05	7.02E-06
0.05	0.0008303	6.1E-05	0.000618	0.00055	0.001207	0.000427	0.000406	0.000309	0.000563	0.000454	2.5E-05	7.02E-06
0.09	0.0007988	0.000125	0.000608	0.000382	0.00114	0.0006	0.000369	5.21E-05	0.000597	0.000403	2.5E-05	6.2E-06
0.13	0.0012131	0.000161	0.000544	0.000177	0.00061	0.000512	0.000288	0.000383	0.000643	0.000328	2.5E-05	4.36E-06
0.18	0.0009193	0.000347	0.000484	6.78E-05	0.000438	0.000582	0.000273	0.00066	0.000705	0.000258	2.19E-05	4.09E-06

Figura 4-6. Exemplo representativo da série temporal valores do RMSE em cada sonda para o ensaio com $T=12$ s e $H=4.5$ m

Foram extraídos os valores médios da elevação da superfície livre no tempo das 4 repetições escolhidas por ensaio, por sonda, de maneira, a serem importados para o *software* SAM_16AI. Neste *software* e com uma frequência de 25 Hz, é eliminado o tempo inicial da série de ondas de maneira a obter a altura de onda média, H_m , e o período médio, T_m , de cada ensaio.

Na Figura 4-7 pode ser observada uma série temporal da sonda G10 com as 4 repetições escolhidas.

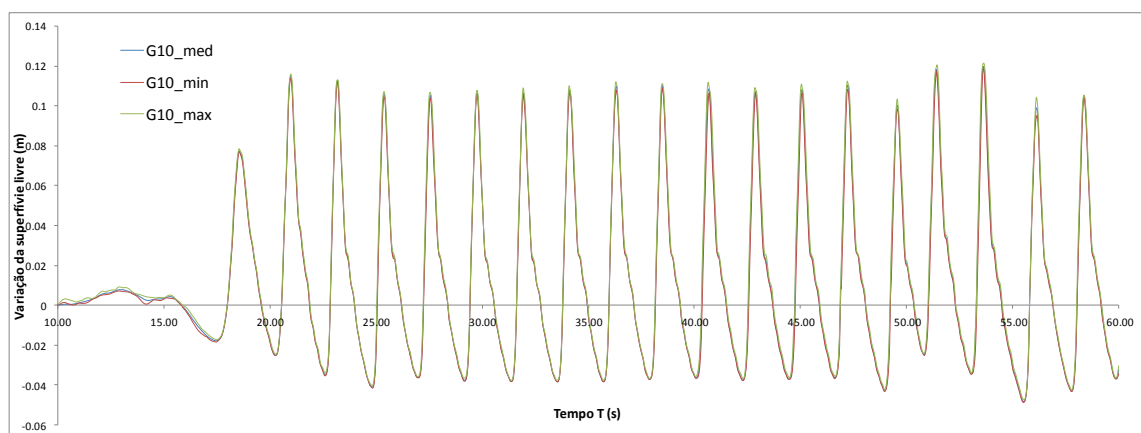


Figura 4-7. Exemplo representativo da série temporal da superfície livre na sonda G10 para o ensaio com $T=12$ s e $H=4.5$ m

Tabela 4. Exemplo representativo de um ficheiro de saída do programa SAM_16AI e dos resultados extraídos (ensaio sem estrutura, 7 sondas)

Sonda	n	H_m (m)	T_m (s)
0	1501	0.098958	1.835
1	1501	0.096389	1.8325
2	1501	0.10416	1.8375
3	1501	0.12096	1.8375
4	1501	0.12458	1.8306
5	1501	0.097042	1.8306
6	1501	0.11642	1.8275

De destacar que, na Figura 4-7, os resultados obtidos para as quatro repetições foram muito semelhantes, o que ocorreu em todos os ensaios, permitindo concluir que houve repetibilidade nas condições de ensaio.

4.2. Apresentação de resultados

4.2.1. Ensaios sem estrutura

Nos ensaios sem estrutura, o declive do fundo é de 2.1%, como foi referido anteriormente. Para este declive e para as condições de agitação ensaiadas, a declividade da onda, s , varia entre 0.01 e 0.03 e o número de Iribarren, ξ , varia entre 0.13 e 0.18, o que corresponde a rebentação progressiva.

Nestes ensaios e com base nas séries temporais medidas em cada sonda, calcularam-se os valores médios da altura de onda medida em quatro repetições escolhidas, tal como explicado anteriormente, e o respetivo valor médio do período. Da Tabela 5 à Tabela 11 apresenta-se, para cada condição de agitação (H e T no modelo) a respetiva altura de onda média, H_m , e período médio, T_m . Considerando que os ensaios foram feitos sem a estrutura, a parcela do galgamento é nula.

Tabela 5. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 3.5$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.12	2.19	-13.96	0.05	2.19
			-13.96	0.07	2.18
			-3.79	0.09	2.19
			-2.53	0.12	2.19
			-2.04	0.10	2.19
			-1.23	0.08	2.19
			-0.06	0.10	2.18

Tabela 6. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 4.0$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.13	2.19	-13.96	0.08	2.19
			-13.96	0.07	2.19
			-3.79	0.09	2.19
			-2.53	0.14	2.20
			-2.04	0.11	2.19
			-1.23	0.09	2.18
			-0.06	0.11	2.20

Tabela 7. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 4.5$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.15	2.19	-13.96	0.07	2.19
			-13.96	0.10	2.18
			-3.79	0.14	2.18
			-2.53	0.15	2.19
			-2.04	0.15	2.19
			-1.23	0.13	2.18
			-0.06	0.13	2.19

Tabela 8. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 5.0$ m
(valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.17	2.19	-13.96	0.00	0.00
			-13.96	0.08	2.19
			-3.79	0.12	2.19
			-2.53	0.14	2.19
			-2.04	0.16	2.19
			-1.23	0.15	2.19
			-0.06	0.14	2.18

Tabela 9. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 5.5$ m
(valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.18	2.19	-13.96	0.09	2.19
			-13.96	0.13	2.19
			-3.79	0.17	2.19
			-2.53	0.18	2.18
			-2.04	0.18	2.19
			-1.23	0.18	2.20
			-0.06	0.13	2.18

Tabela 10. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 10$ s e $H = 4.0$ m
(valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.13	1.83	-13.96	0.09	1.84
			-13.96	0.09	1.83
			-3.79	0.10	1.84
			-2.53	0.12	1.84
			-2.04	0.12	1.83
			-1.23	0.09	1.83
			-0.06	0.11	1.83

Tabela 11. Altura média, H_m , e período médio, T_m , para a condição de onda $T = 14$ s e $H = 4.0$ m
(valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)
SM	0.13	2.56	-13.96	0.08	2.55
			-13.96	0.11	2.56
			-3.79	0.12	2.55
			-2.53	0.14	2.55
			-2.04	0.14	2.55
			-1.23	0.13	2.55
			-0.06	0.15	2.56

4.2.2. Ensaios com estrutura

Nos ensaios com estrutura, o declive do talude da estrutura é de 2:3, como foi referido anteriormente. Para este declive e para as condições de agitação ensaiadas, a declividade da onda, s , varia entre 0.01 e 0.03 e o número de Iribarren, ξ , varia entre 4.16 e 5.83, o que corresponderia a rebentação de fundo. No entanto, nos ensaios verificou-se rebentação mergulhante, o que se poderá dever ao facto de os valores limite do número de Iribarren apresentados em 2.2 serem válidos para uma praia de declive constante, o que não é o caso nestes ensaios.

Tal como para os ensaios sem estrutura, nos ensaios com estrutura calcularam-se os valores médios da altura de onda medida em cada sonda e nas quatro repetições escolhidas e o respetivo valor médio do período. Para cada um destes ensaios calculou-se ainda o caudal médio de galgamento, Q . Da Tabela 12 à Tabela 18 apresenta-se, para cada condição de onda (H e T no modelo), para além de H_m e T_m , o caudal médio de galgamento, Q , da estrutura ensaiada.

Tabela 12. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 3.5$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)	Q (l/s/m)
CM	0.12	2.19	-13.96	0.08	2.18	0.00E+00
			-13.96	0.08	2.20	
			-3.79	0.07	1.94	
			-2.53	0.11	2.20	
			-2.04	0.08	1.92	
			-1.23	0.16	2.19	
			-0.06	0.07	1.45	
			0.30	0.09	1.88	
			0.57	0.12	2.19	
			0.75	0.08	2.19	
			0.87	0.00	2.19	

Tabela 13. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T = 12$ s e $H = 4.0$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)	Q (l/s/m)
CM	0.13	2.19	-13.96	0.09	2.19	3.64E-02
			-13.96	0.08	2.20	
			-3.79	0.08	2.00	
			-2.53	0.06	2.19	
			-2.04	0.09	1.80	
			-1.23	0.18	2.20	
			-0.06	0.06	1.21	
			0.30	0.11	1.85	
			0.57	0.13	2.19	
			0.75	0.09	2.19	
			0.87	0.00	1.49	

Tabela 14. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T= 12$ s e $H= 4.5$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)	Q (l/s/m)
CM	0.15	2.19	-13.96	0.09	2.19	5.84E-01
			-13.96	0.11	2.20	
			-3.79	0.08	1.46	
			-2.53	0.15	2.20	
			-2.04	0.12	1.80	
			-1.23	0.20	2.20	
			-0.06	0.09	1.43	
			0.30	0.13	2.04	
			0.57	0.14	2.20	
			0.75	0.10	2.20	
			0.87	0.04	2.20	

Tabela 15. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T= 12$ s e $H= 5.0$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)	Q (l/s/m)
CM	0.17	2.19	-13.96	0.07	2.04	1.03
			-13.96	0.12	2.20	
			-3.79	0.11	1.68	
			-2.53	0.15	2.04	
			-2.04	0.12	1.54	
			-1.23	0.22	2.20	
			-0.06	0.12	1.79	
			0.30	0.13	2.05	
			0.57	0.15	2.20	
			0.75	0.10	2.20	
			0.87	0.05	2.20	

Tabela 16. Altura média, H_m , período médio, T_m , e caudal médio de galgamento, Q , para a condição de onda $T= 12$ s e $H= 5.5$ m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	H_m (m)	T_m (s)	Q (l/s/m)
CM	0.18	2.19	-13.96	0.00	0.00	1.36
			-13.96	0.13	2.19	
			-3.79	0.15	2.20	
			-2.53	0.16	2.23	
			-2.04	0.17	2.11	
			-1.23	0.14	1.46	
			-0.06	0.23	2.18	
			0.30	0.15	2.03	
			0.57	0.12	1.81	
			0.75	0.15	2.18	
			0.87	0.11	2.18	

Tabela 17. Altura média, Hm, período médio, Tm, e caudal médio de galgamento, Q, para a condição de onda T= 10 s e H= 4.0 m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	Hm (m)	Tm (s)	Q (l/s/m)
CM	0.13	1.83	-13.96	0.09	1.92	0.00E+00
			-13.96	0.11	1.99	
			-3.79	0.09	1.76	
			-2.53	0.06	1.84	
			-2.04	0.13	2.03	
			-1.23	0.11	2.05	
			-0.06	0.09	1.82	
			0.30	0.10	1.77	
			0.57	0.11	1.85	
			0.75	0.07	1.85	
			0.87	0.00	0.00	

Tabela 18. Altura média, Hm, período médio, Tm, e caudal médio de galgamento, Q, para a condição de onda T= 14 s e H= 4.0 m (valores do modelo)

Caso	H (m)	T (s)	x (m)	Hm (m)	Tm (s)	Q (l/s/m)
CM	0.13	2.56	-13.96	0.11	2.60	5.48E-01
			-13.96	0.12	2.64	
			-3.79	0.14	2.63	
			-2.53	0.07	1.44	
			-2.04	0.11	2.41	
			-1.23	0.17	2.57	
			-0.06	0.12	2.46	
			0.30	0.09	1.58	
			0.57	0.15	2.54	
			0.75	0.10	2.54	
			0.87	0.00	0.00	

4.3. Análise de resultados

4.3.1. Ensaios sem estrutura

Tal como referido anteriormente, no primeiro grupo de ensaios sem estrutura, para um valor constante de $T=12$ s, fez-se variar a altura de onda (H) entre 3.5 m e 5.5 m, com um incremento de 0.5 m entre ensaios. Os valores de H_m medidos em cada sonda e para cada condição de agitação estão apresentados na Figura 4-8. Analisando esta figura pode observar-se que, para a menor altura de onda ensaiada, $H=3.5$ m (Tabela 5), o valor de H_m aumenta ao longo do canal até atingir um máximo, reduzindo após este valor. Essa redução de altura está normalmente associada à rebentação da onda, onde se dá uma forte dissipação da energia. Assim, da análise da posição desse máximo pode-se inferir da zona de rebentação. Neste caso, $H=3.5$ m, a rebentação da onda dá-se na vizinhança da sonda G4 ($x=-2.53$ m), onde se obteve um valor de H_m máximo igual a 0.12 m. Quando aumentamos a altura de onda para 4.0 m (Tabela 6), também parece haver rebentação nas imediações da sonda G4, onde se obteve um valor de H_m de 0.14 m, superior ao do caso anterior. Ao aumentar a altura de onda para 4.5 m (Tabela 7), observa-se um comportamento semelhante, com a onda a rebentar na mesma zona, obtendo-se nas sondas G4 e G5 um valor de H_m de 0.15 m. Quando analisamos uma onda de 5.0 m (Tabela 8), esta rebenta apenas nas proximidades da sonda G5, onde se obteve um valor de H_m de 0.16 m. Por fim, para uma altura de onda de 5.5 m (Tabela 9), a redução de altura de onda medida ocorre após a sonda G6, onde se obteve um valor de H_m de 0.18 m.

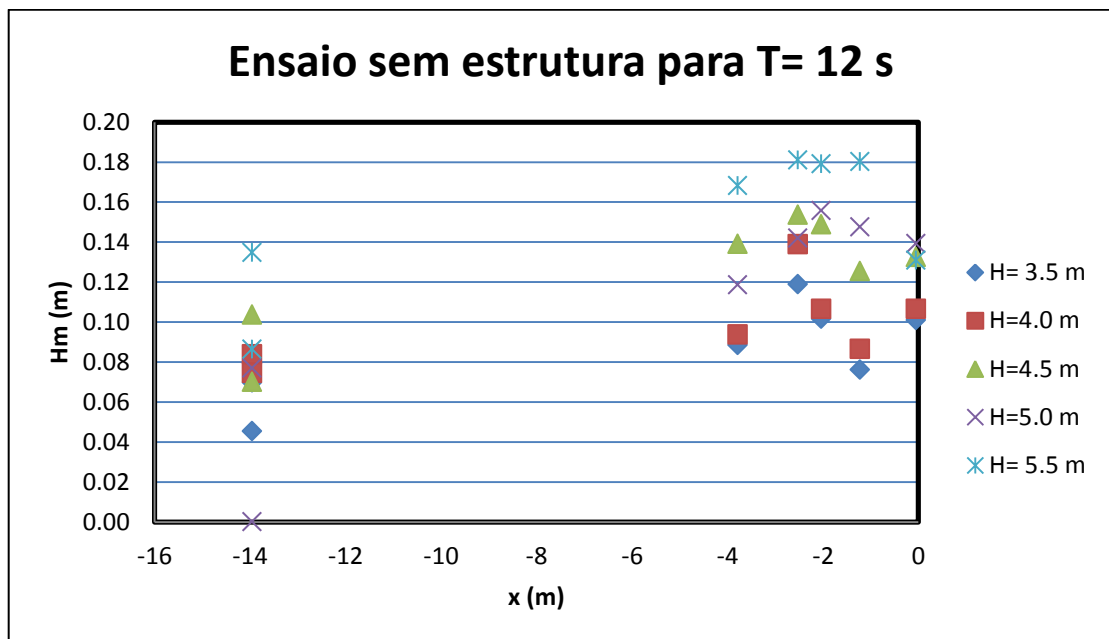


Figura 4-8. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda x , para o período $T= 12$ s, variando a altura de onda H

Para analisar a influência do período na evolução da altura de onda ao longo do canal analisaram-se os resultados do segundo grupo de ensaios sem estrutura, ensaios com a mesma altura de onda de $H=4.0$ m e três períodos distintos: 10 s (Tabela 10), 12 s (Tabela 6) e 14 s (Tabela

11). Nestes casos, a rebentação ocorreu na vizinhança das sondas G4 ou G5, com os respectivos valores máximos H_m de 0.12 m, 0.14 m e 0.14 m, respectivamente (Figura 4-9). Importa ressaltar que o adiamento ou antecipação do início da rebentação é afetado principalmente pela alteração da profundidade, h (Figura 3-6).

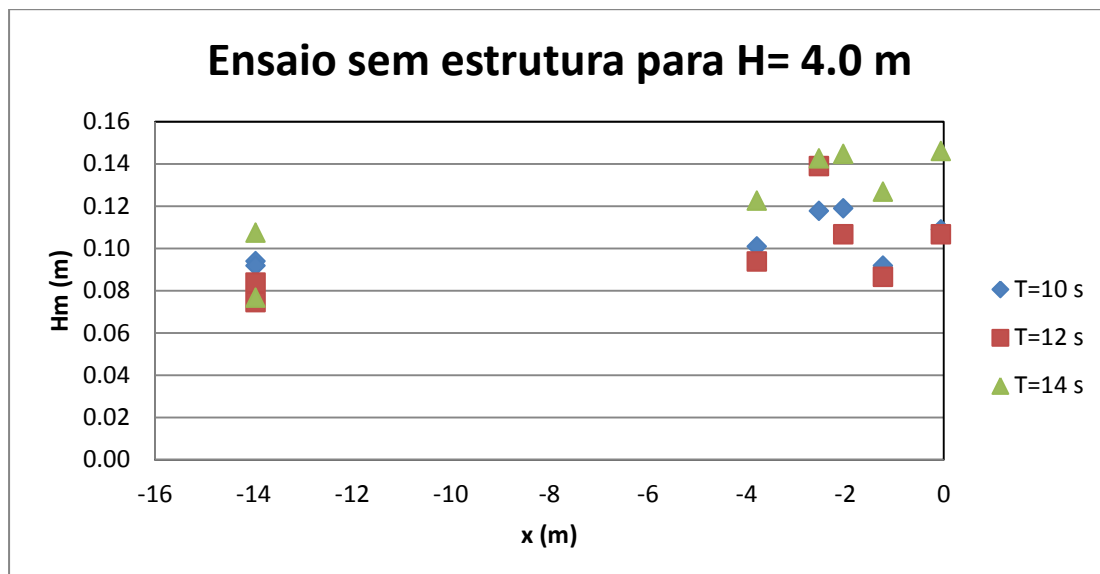


Figura 4-9. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda x , para a altura de onda $H = 4.0$ m, variando o período da onda T

Com a análise anterior pode-se concluir que, para um período de 12 s e um aumento progressivo de H , a rebentação da onda dá-se numa mesma zona do canal, mas a altura de onda medida na sonda G4, a partir da qual, em geral, ocorre uma redução da altura de onda, aumenta com o aumento da altura de onda incidente.

Na Figura 4-10 pode observar-se, para o ensaio com as condições de onda de $T = 12$ s e $H = 4.0$ m, uma série temporal de superfície livre para uma sonda colocada perto do bater, sonda G2. Na legenda desta figura pode observar-se como “med” os valores médios das 4 repetições escolhidas, “min” a repetição de menor valor e “max” a repetição de maior valor. Como se pode observar, apenas a partir de aproximadamente 40 s se obtém a estabilização do sinal, isto é, a superfície livre resultante da soma das ondas incidente e refletida.

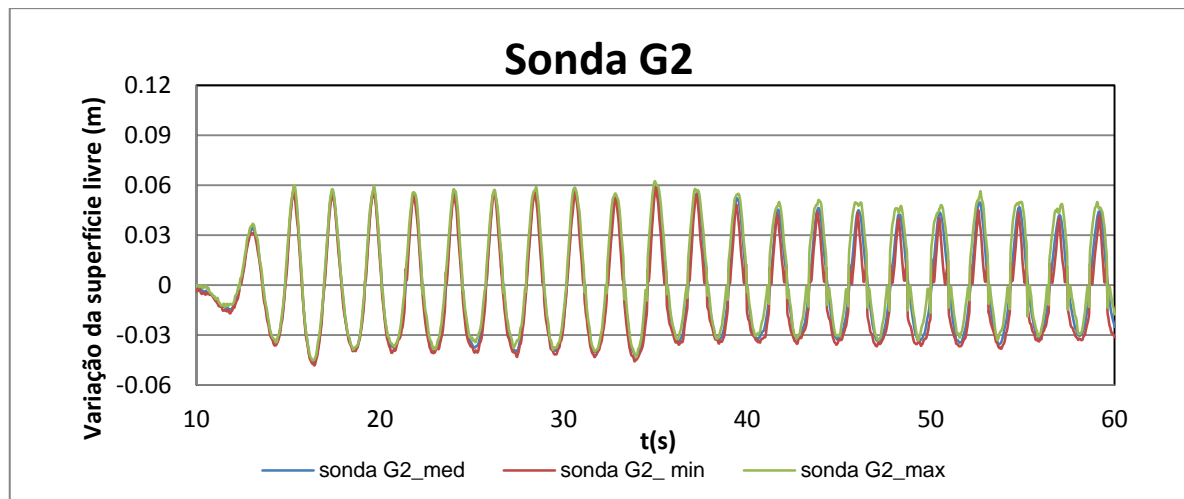


Figura 4-10. Série temporal da sonda G2, para $T=12$ s e $H=4.0$ m

Na Figura 4-11 mostra-se uma série temporal da superfície livre nas imediações da zona de rebentação, perto da sonda G4, no talude em frente à estrutura. Como se pode observar, a estabilização dá-se mais cedo, por volta das 30 s, já que esta sonda se encontra mais próxima da fronteira refletora.

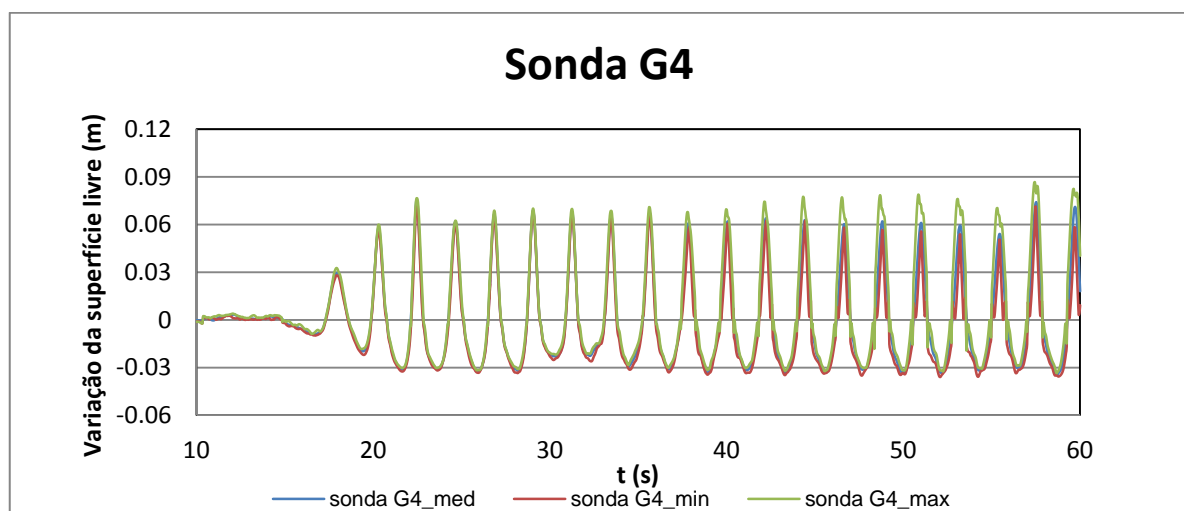


Figura 4-11. Série temporal da sonda G4, para $T=12$ s e $H=4.0$ m

Perto da sonda G4 podem verificar-se as maiores alturas de onda, dado que é nesta zona que ocorre a rebentação para $H=4.0$ m e $T=12$ s.

4.3.2. Ensaios com estrutura

Para os ensaios com estrutura, importa analisar a informação contida na Tabela 12 à Tabela 18. Considerando os ensaios com um período igual a 12 s e com diferentes alturas de onda, e analisando novamente a zona onde se obteve o máximo de altura de onda, para $H=3.5$ m, a rebentação ocorre na proximidade da sonda G6 (Tabela 12), com um máximo de H_m de 0.16 m enquanto no caso do

ensaio sem estrutura a rebentação ocorreu nas imediações da sonda G4 para Hm de 0.1 m (Tabela 5).

Aumentando a altura de onda para 4.0 m, a rebentação da onda ocorreu na vizinhança da sonda G6, para um Hm de 0.18 m (Tabela 13), enquanto no caso do ensaio sem a estrutura a rebentação ocorreu nas imediações da sonda G4, com um Hm de 0.14m (Tabela 6). Obteve-se um Hm de 0.2 m para uma onda ensaiada com H de 4.5 m, sendo que a sua rebentação ocorreu na sonda G6 (Tabela 14), enquanto para o ensaio sem estrutura a rebentação ocorreu nas proximidades das sondas G4 e G5, para Hm de 0.15 m (Tabela 7). Para uma altura de onda de 5 m a rebentação continuou a ocorrer na vizinhança da sonda G6, alcançando um Hm de 0.22 m (Tabela 15), enquanto a rebentação no ensaio sem estrutura se verificou na vizinhança da sonda G5 com Hm de 0.16 m (Tabela 7). Por fim, para uma altura de onda de 5.5 m obteve-se um Hm de 0.23 m e a rebentação deu-se na vizinhança da sonda G7 (Tabela 16), enquanto no ensaio sem estrutura a rebentação deu-se após a sonda G6 com Hm de 0.18 m (Tabela 9).

Considerando uma altura de onda constante igual a 4.0 m, para um período de 10 s obteve-se a rebentação da onda na vizinhança da sonda G5 com um Hm de 0.13 m (Tabela 17), enquanto para o ensaio sem estrutura a rebentação ocorreu na vizinhança das sondas G4/G5 com Hm de 0.12 m (Tabela 10). Já para um período de 14 s, a rebentação deu-se na sonda G6 com Hm de 0.17 m (Tabela 18), enquanto no ensaio sem estrutura a rebentação ocorreu entre a sonda G4 e G5 com Hm de 0.14 m (Tabela 11).

Os resultados mostram ainda que, para um período de 12 s e um aumento progressivo de H, a rebentação da onda dá-se numa mesma zona do canal, ao redor da sonda G6, mas a altura Hm aumenta com o aumento da onda incidente. Com a variação do período não existem tendências não evidentes.

Comparando com o caso sem estrutura, Tabela 19 e Tabela 20, a rebentação com estrutura dá-se mais à frente no canal, mais próximo da estrutura, e para valores de Hm superiores. Neste caso, com estrutura, a posição da rebentação e o valor de Hm são afetados pela alteração da profundidade, h, mas também pela reflexão/rebentação da onda que se verifica na estrutura. O mesmo se pode observar analisando a Figura 4-12 e Figura 4-13.

Tabela 19. Comparação de Hm para T=12 s com respetiva variação H para ensaios com e sem estrutura

H (m)	Com estrutura		Sem estrutura	
	Sonda	Hm (m)	Sonda	Hm (m)
3.5	G6	0.16	G4	0.12
4.0	G6	0.18	G4	0.14
4.5	G6	0.20	G4/G5	0.15
5.0	G6	0.22	G5	0.16
5.5	G7	0.23	G5/G6/G8	0.18

Tabela 20. Comparação de H_m para $H=4.0$ m com respectiva variação de T para ensaios com e sem estrutura

T (s)	Com estrutura		Sem estrutura	
	Sonda	H_m (m)	Sonda	H_m (m)
10	G5	0.13	G4/G5	0.12
12	G6	0.18	G4	0.14
14	G6	0.17	G4/G5	0.14

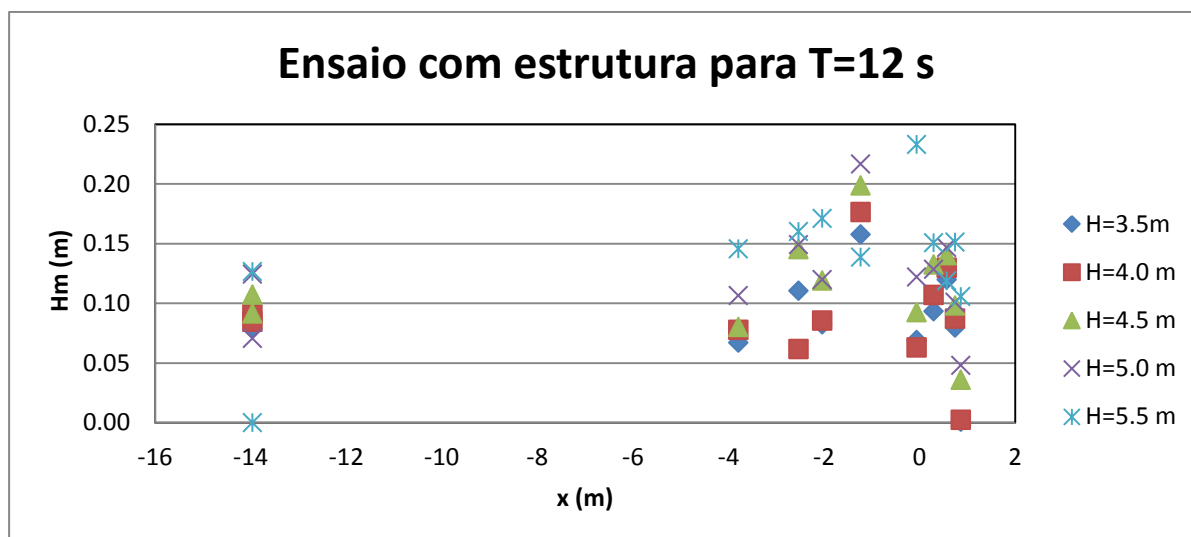


Figura 4-12. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda, x , para o período $T=12$ s, variando a altura de onda H

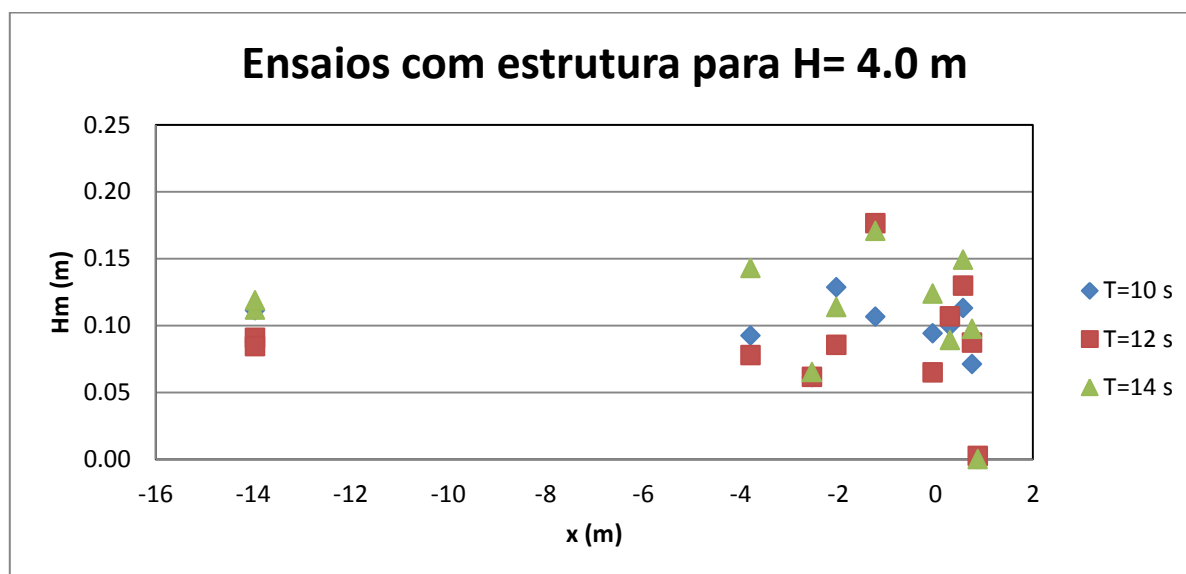


Figura 4-13. Altura de onda média, H_m , em função da posição da sonda, para a altura de onda $H=4.0$ m e diferentes períodos (T)

Da Tabela 12 à Tabela 18 encontram-se também os respectivos valores do caudal médio galgado, em l/s/m, para as diferentes condições de onda ensaiados, os quais foram organizados na Tabela 21 para mais fácil visualização.

Tabela 21. Caudal Q em função das condições de onda (valores no protótipo)

H (m)	T (s)	Q (l/s/m)
3.5	12	0.0
4.0		6.0
4.5		96.0
5.0		169.5
5.5		222.8

H (m)	T (s)	Q (l/s/m)
4.0	10	0.0
	12	6.0
	14	90.1

Com a análise do primeiro grupo de ensaios e da Tabela 21 pode concluir-se que, para um período de 12 s e uma altura de onda de 3.5 m, o caudal galgado por metro de estrutura, Q, é nulo. Para o mesmo período e uma altura de onda de 4.0 m existe já um galgamento de 6.0 l/s/m. Para uma altura de onda de 4.5 m, o caudal galgado aumentou significativamente atingindo valores de 96.0 l/s/m. Relativamente à altura de onda de 5.0 m, o caudal quase que duplicou relativamente ao ensaio anterior. Para uma altura de onda de 5.5 m o caudal médio galgado atinge o maior valor de todos os ensaios realizados.

Analisando o segundo grupo de ensaios, para uma altura de onda constante igual a 4 m, considerando os períodos de 10 s, 12 s e 14 s, verificou-se que, para os 10 s, o caudal galgado é nulo). Para um período de 12 s, o caudal galgado toma o valor de 6.0 l/s/m, atingindo o valor de 90.1 l/s/m para o período de 14 s, aumentando significativamente relativamente à condição anterior.

Para uma melhor visualização das observações supra mencionadas, apresenta-se na Figura 4-14 e na Figura 4-15 a variação do caudal médio galgado com a altura de onda e com o período, respetivamente.

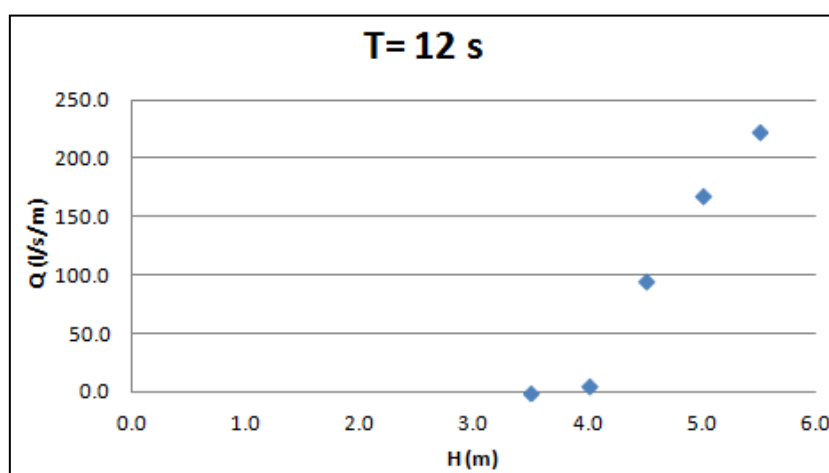


Figura 4-14. Caudal médio galgado, Q, para o período T= 12 s, em função da altura de onda, H

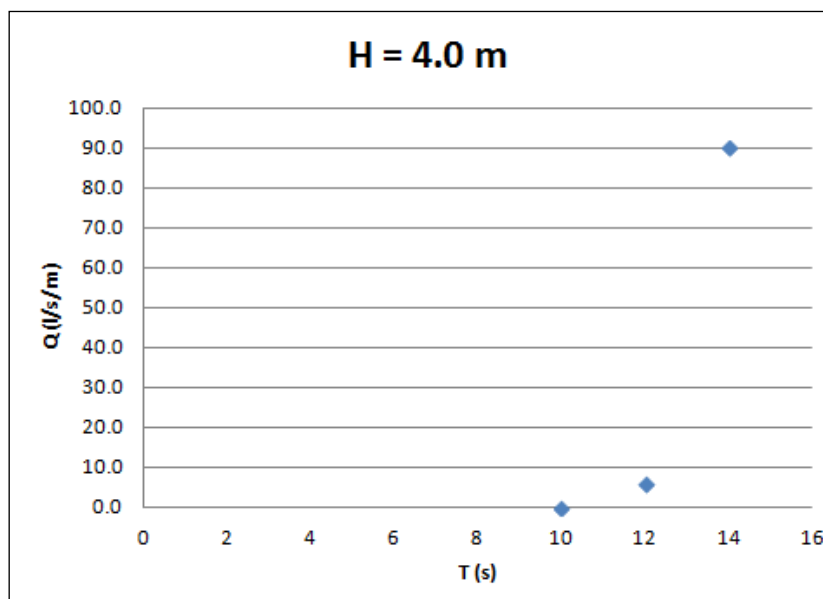


Figura 4-15. Caudal médio galgado, Q , para a altura de onda $H=4.0$ m, em função do período, T

A Figura 4-16 ilustra a ocorrência de galgamento durante o ensaio com $H=4.0$ m e $T=12$ s



Figura 4-16. Ocorrência de galgamento durante o ensaio com $H=4.0$ m e $t=12$ s

Finalmente, analisam-se as séries temporais da superfície livre em algumas sondas para o ensaio com as condições de onda de $T=12$ s e $H=4.0$ m. Na Figura 4-17 pode observar-se, para este ensaio, uma série temporal da superfície livre para uma sonda colocada perto do batedor, sonda G2.

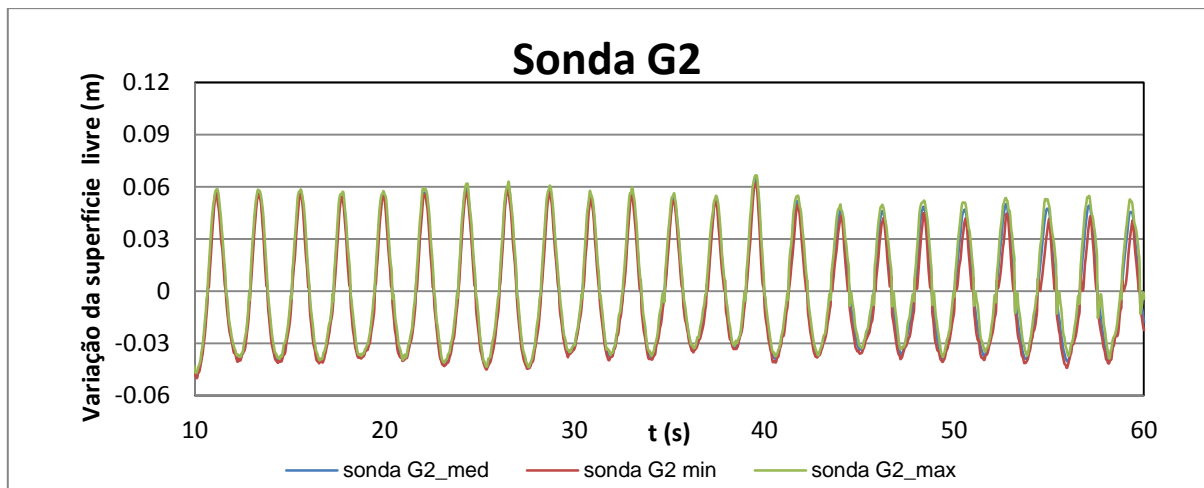


Figura 4-17. Série temporal da sonda G2, para $T=12$ s e $H=4.0$ m

Perto da sonda G6, Figura 4-18, podem verificar-se as maiores alturas de onda, dado que é nesta zona que ocorre a rebentação no ensaio com estrutura para $H=4.0$ m e $T=12$ s. Pode observar-se que, nesta sonda, a onda deixa de ser sinusoidal, apresentando harmónicas devidas a efeitos não lineares, tal como a reflexão, que ocorrem devido à presença da estrutura.

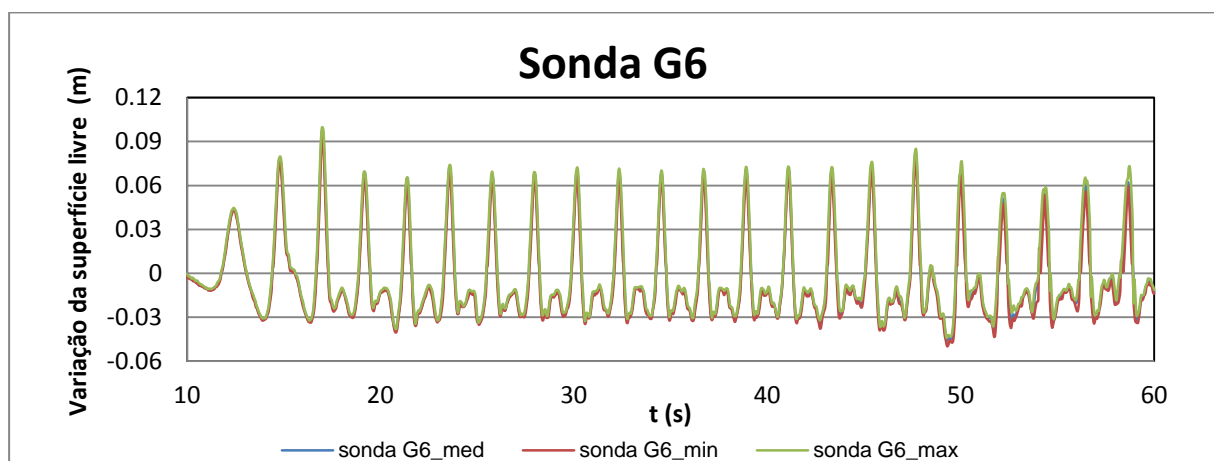


Figura 4-18. Série temporal da sonda G6, zona de rebentação, para $T=12$ s e $H=4.0$ m

5. Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

Com o objetivo de estudar o fenómeno do galgamento em estruturas marítimas, realizaram-se ensaios em modelo físico para analisar a interação da onda com o quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira. Este quebra-mar tem sido alvo de estudo no âmbito do projeto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) para aplicações a estruturas costeiras”, que incluiu campanhas de campo, ensaios em modelo físico e modelação numérica. Esta dissertação insere-se no âmbito dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos pela equipa do projeto (Didier *et al.*, 2011 e Ferreira *et al.*, 2013) e apresenta os ensaios realizados no âmbito deste projeto.

Os ensaios de um perfil do quebra-mar foram realizados num canal de ondas do LNEC, à escala 1:30. Foram medidas elevações da superfície livre em diferentes pontos do canal e o volume galgado para diferentes condições de agitação marítima regular. Realizaram-se dois grupos de ensaios: um onde se manteve o período da onda, $T=12$ s, e se alterou a altura de onda de 3.5 m a 5.5 m, com um incremento de 0.5 m; um segundo, onde se adotou um valor de altura de onda, $H=4$ m, e se variou o período de 10 s a 14 s, com incremento de 2 s. Todos estes ensaios foram realizados sem e com o perfil do quebra-mar no modelo.

Considerando os resultados dos ensaios feitos sem e com estrutura para o período de 12 s e para as alturas de onda estudadas, pode-se concluir que a altura de onda na proximidade da estrutura aumenta devido ao efeito do fundo e/ou da presença da estrutura (reflexão na estrutura).

Dos resultados dos ensaios com estrutura e relativamente ao caudal médio galgado, conclui-se que, para o período de 12 s, o caudal médio galgado aumenta com o aumento da altura de onda, sendo nulo apenas para 3.5 m. Para os ensaios em que se manteve a altura de onda constante de 4.0 m e se fez-se variar o período, conclui-se que o caudal aumenta com o aumento do período, sendo nulo apenas o correspondente a 10 s.

No futuro, seria de elevada utilidade executarem-se ensaios com outras condições de onda que não as ensaiadas e analisadas nesta dissertação, incluindo a utilização de ondas irregulares, dado que apenas foram consideradas ensaios com ondas regulares.

Outra situação interessante de se investigar seria o efeito da porosidade dos mantos do quebra-mar na rebentação e/ou no galgamento. Para tal, seria necessária a reconstrução do modelo, utilizando materiais de diferentes granulometrias.

Bibliografia

Allsop, N.W.H.; Pullen, T., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J.W. (1996), EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual.

Besley, P. (1999), "Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual", R&D Technical Report W178, HR Wallingford, ISBN 185705069X, UK Environment Agency, Bristol.

Capitão, R. (2002). Modelação Estocástica Numérica e Física da Agitação Marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Abril.

Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A., Pozueta, B. (2005), Report WP8: Neural Network – Manual NN_overtopping 2, European Project CLASH.

Didier, E.; Ferreira, O.; Matias, A.; Neves, M.G.; Pacheco, A.; Reis, M.T. (2011). Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamic para aplicação a estruturas costeiras. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, 6 a 7 de Outubro de 2011, Delegação Portuguesa da PIANC.

Ferreira, Ó., Reis, M.T., Carrasco, A.R., Neves, M.G., Neves, D., Didier, E. (2013), Small overtopping at Albufeira harbour: field measurements and modelling, 6th SCACR, International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 5-7 Jun, Lisboa.

HYDRALABIII Consortium (2007). Guidelines for Physical Model Testing of Breakwaters: Rubble Mound Breakwaters. HYDRALABIII Deliverable NA3.1-2, EC contract no. 022441 (RII3), agosto.

Neves, D.R.C.B., Didier, E., Reis, M.T., Neves, M.G. (2012). Overtopping of a porous structure using a Smoothed Particle Hydrodynamics numerical model. 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Coastlab12, 17- 20 Sep., Ghent, Belgium.

Patrício, T.M.S. (2012), Modelação numérica do galgamento de quebra-mares de talude, Tese de Mestrado FCT UNL.

Pita, C.A.R.M. (1984). Dimensionamento de Quebra-mares e dos seus Elementos Construtivos. Emprego de Blocos de Betão no Perfil-corrente de Quebra-mares de Talude. Relatório 126/85 - NPP. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio.

Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J.W. (2007). EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Environment Agency, UK, Expertise Network Waterkeren, NL, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE.

Rodrigues, E.J.C.S. (2011) Galgamento de Estruturas Marítimas. Comparação de Ferramentas de Cálculo, Tese de Mestrado, IPS.

Sabino, A.; Rodrigues, A.; Araújo, J.; Poseiro, P.; Reis, M.T.; Fortes, C.J. (2014). "Wave overtopping analysis and early warning forecast system". Proc. ICCSA 2014, 14th International Conference on Computational Science and Its Applications, 30 junho a 3 de julho, Universidade do Minho, Guimarães.

USACE (2006). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C. (6 volumes)

Van der Meer, Steendam G.J., Verhaeghe H., Besley, Franco L., Van Gent M.R.A, (1998). The international database on wave overtopping, Proc. 29th ICCE, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapura.

Van Gen, M.R.A, Coeveld E.M., Pozueta B., (2005). Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2, CLASH WP8 – Report.

Wedge, D.C., Ingram, D.M., Mingham, C.G., Mclean, D.A., Bandar, Z.A. (2005). Neural network architectures and overtopping predictions. Maritime Engineering, Proc. ICE, 158(MA3), 123-133.